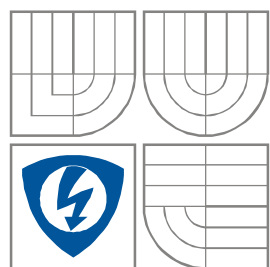


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ**  
**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# OPTIMALIZACE ANTÉN NA EBG SUBSTRÁTECH TZV. KOLONIÍ MRAVENCŮ

ANT COLONY OPTIMIZATION OF ANTENNAS ON EBG SUBSTRATES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Bc. Roman Wilder

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. Jiří Horák

BRNO, 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Roman Wilder  
Bytem: Osík 289, 569 67  
Narozen/a (datum a místo): 24. prosince 1983 v Litomyšli

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Optimalizace antén na EBG substrátech tzv. kolonií mravenců

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Horák

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací antén na EBG substrátech pomocí metody kolonie mravenců (ACO). Tato metoda vychází z komunikačních mechanismů reálné kolonie mravenců. V první části této práce je rozebrána teorie planárních antén a také teorie ACO. Dále je popsán princip funkce EBG substrátů a obecně fyzikální jevy uplatňující se při šíření elektromagnetické vlny periodickým prostředím. V další části byla ACO implementována do jazyka VBA a aplikována na dva modely planárních antén. Tyto modely byly vytvořeny v programu CST Microwave Studio. Po optimalizaci antén byly vyhodnoceny výsledky a u jedné z antén bylo provedeno porovnání s optimalizačními metodami v CST Microwave Studio. U druhého modelu byl poté standardní substrát nahrazen substrátem s EBG a výsledky byly porovnány. Byly použity 2 typy mřížek EBG. U čtvercové byl popsán postup návrhu mřížky a byl získán modelováním v CST disperzní diagram. Nakonec bylo provedeno ověření získaných výsledků v programu Ansoft HFSS a výsledky získané výsledky byly mezi sebou porovnány.

## **Klíčová slova**

Optimalizace kolonií mravenců, flíčková anténa, substráty s elektromagnetickými zádržnými pásmy.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with optimization of planar antennas on the Electromagnetic Bandgap (EBG) substrates by the help of Ant Colony Optimization (ACO). This method is based on the communications mechanisms of a real ant colony. Firstly, the working principle of the planar antennas and the theory of the Ant Colony Optimization are analyzed. Next, the description of the working principle of the Electromagnetic Bandgap and generally physical phenomena accompanying electromagnetic waves propagation in a periodic medium are given. In the second part of this thesis, the ACO was implemented into the VBA language, and was applied to two models of planar antennas. These models were created in the CST Microwave Studio. After an optimization of the antennas the results were evaluated, and the optimization of one of the antennas was compared to the optimization methods in CST Microwave Studio. Then, the standard substrate of the second model was replaced by the EBG substrate, and the results were confronted. Two types of EBG lattice were used. The design procedure of the square lattice was described, and the dispersion diagram was created in the CST Microwave Studio. In the final part of thesis, the verification of the results was carried out in Ansoft HFSS, and the results from both simulation programs were compared to each other.

## **Keywords**

Ant colony optimization, patch antenna, electromagnetic bandgap substrate.

## **Bibliografická citace dle ČSN ISO 690**

WILDER, R. *Optimalizace antén na EBG substrátech tzv. kolonií mravenců*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Horák.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optimalizace antén na EBG substrátech tzv. kolonií mravenců jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2008

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Horákovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Planární antény</b>	<b>2</b>
2.1	Vícepásmové planární antény	3
<b>3</b>	<b>Optimalizace kolonií mravenců</b>	<b>5</b>
3.1	Optimalizace obecně	5
3.2	Biologické pozadí	5
3.2.1	Experiment s dvojíým mostem	6
3.3	Umělí mravenci	8
3.4	Algoritmus optimalizace	8
<b>4</b>	<b>Substráty s elektromagnetickými zádržnými pásmy</b>	<b>13</b>
4.1	Historie výzkumu periodických struktur	13
4.2	Periodické struktury a jejich analýza	13
4.2.1	Analýza jednorozměrných periodických struktur	15
4.2.2	Analýza dvourozměrných periodických struktur	16
4.2.3	Analýza trojrozměrných periodických struktur	17
<b>5</b>	<b>Praktická část</b>	<b>18</b>
5.1	Nastavení optimalizační metody kolonie mravenců	18
5.2	Vícepásmová planární anténa se dvěma U-šterbinami	20
5.2.1	Optimalizace kolonií mravenců	22
5.2.2	Ověření výsledků optimalizace kolonií mravenců	28
5.3	Trojúhelníková anténa s dvojicí podélných šterbin	29
5.3.1	Optimalizace kolonií mravenců	36
5.3.2	Návrh substrátu s elektromagnetickými zádržnými pásmy (EBG)	52
5.3.3	Aplikace EBG struktury s čtvercovou mřížkou na model antény	54
5.3.4	Aplikace EBG struktury s trojúhelníkovou mřížkou na model antény	62
5.4	Ověření výsledů optimalizace	64
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Seznam literatury</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>Seznam zkratk</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>Seznam symbolů</b>	<b>72</b>
<b>10</b>	<b>Příloha</b>	<b>73</b>

# 1 Úvod

V dnešní době se stále častěji objevují požadavky na bezdrátový přenos dat, díky které již nejsou uživatelé vázáni k jednomu bodu v místnosti a také nemusí složitě řešit propojení mezi několika zařízeními pomocí kabelů. Týká se to především rozvoje bezdrátových sítí (např. standard 802.11 - Wi-Fi). Tento typ sítí nelézá své uplatnění nejen při vytváření síťové infrastruktury v podnicích a kancelářských prostorách, ale stále častěji se stává primárním možností sdílení přístupu na internet i pro domácnosti. Také se objevují snahy některých společností přenášet bezdrátově i video ve vysokém rozlišení z domácích přehrávačů (firmy sdružené v alianci WirelessHD – např. Panasonic). S rozvojem telekomunikací se také stále častěji objevují požadavky na zařízení, jenž bude mít v sobě implementováno co nejvíce moderních komunikačních služeb (GSM, UMTS, GPS, Wi-Fi, Bluetooth ...). Pro všechny tyto aplikace je nutné používat antény s vyhovujícími parametry na všech frekvencích, které dané zařízení obsluhuje. Jednou z možností jak toho docílit je použití vícepásmových antén. K návrhu takových to antén se pak používají některé ze současných optimalizačních metod, jenž jsou schopny samy vyhodnocovat vhodnost řešení a případně podle kvality nalezeného řešení upravovat optimalizované parametry (tedy rozměry antény, umístění napájecího portu atd.).

Jednou z těchto metod je i optimalizace kolonií mravenců (*Ant Colony Optimization - ACO*). Tato metoda vychází z komunikačních mechanismů reálných mravenčích kolonií. V současné době je v optimalizaci planárních struktur zastíňována genetickými algoritmy a metodou rojů částic (*Particle Swarm Optimization - PSO*), ovšem je hojně využívána při optimalizaci délky trasy mezi více body (např. model sítě British Telecom) a v průmyslové výrobě (výroba oceli, plánování rozpočtů atd.).

Cílem této práce je vytvořit skript v jazyce VBA, pomocí kterého bude možné provádět optimalizaci vícepásmových planárních antén. Dále bude zkoumán vliv periodických struktur typu EBG na vlastnosti vícepásmové antény.



## 2 Planární antény

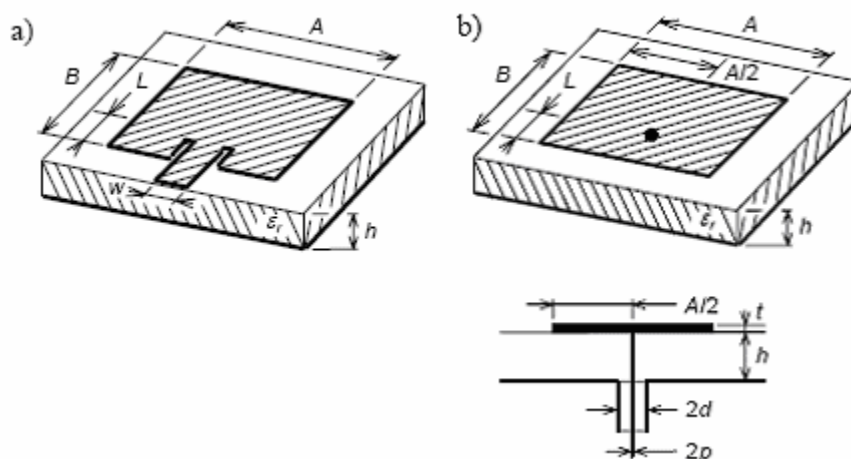
Historie tohoto typu antén začala v 50. letech minulého století, kdy se objevil požadavek armády na antény, jež by kopírovali povrch letadel a jiné vojenské techniky. Tento požadavek splnili právě planární antény, které vynikají nízkým profilem. Praktické použití ovšem umožnil až objev nových materiálů, které byly použity jako substráty. Od 70. let minulého století tedy dochází k rozšíření tohoto typu antén, nejdříve samozřejmě v aplikacích určených pro využití v armádě. Později nachází uplatnění i v civilních oblastech.

V dnešní době jsou prakticky základním kamenem všech mobilních komunikačních systémů. Uplatnění nalézají v klasických radiotelefoních systémech (např. GSM), v pagerech, v satelitních navigačních přístrojích (např. GPS), v moderních bezdrátových datových sítích (např. standardy Wi-Fi, WiMAX, HyperLAN 2) atd.

Jejich hlavní výhoda je to, že jsou vyráběny stejnou technologií jako tištěné spoje, a proto je jejich výroba levná a snadno reprodukovatelná. Další předností, vyplývající z stylu výroby, je snadné propojení s mikrovlnnými obvody vyrobenými mikropáskovou technologií, kdy nejsou nutné žádné přídavné napájecí obvody. Planární antény totiž umožňují napájení přímo mikropáskovým vedením. Další výhodou planárních antén jsou velmi vysoké frekvence, na kterých se dají používat. Pásmo jejich využití je od 100 MHz až po kmitočty cca 100 GHz. Tyto antény jsou lehké a mají nízký profil, což umožňuje jejich snadné umístění na trupy letadel, stěny budov či odvrácené strany mobilních telefonních přístrojů.

Velkou nevýhodou planárních antén je jejich malý zisk (většinou okolo 6 dBi) a malý výkon, kterým mohou vyzařovat. Vzhledem k tomu, že většina typů planárních antén používá zemnicí plochu, což je kovová destička, vyzařuje anténa pouze v jedné polorovině.

Napájení planárních antén se řeší 2 různými způsoby. Jeden způsob je, jak už bylo zmíněno výše, mikropáskovým vedením. Tento způsob je ukázán na *obr. 2-1a*). Pro jednoduchost je tato ukázka provedena na anténě, která se skládá pouze z jednoho anténního prvku, který se nazývá flíček (*patch*). Hlavní výhoda tohoto druhu napájení je snadná realizace, protože se vedení vyrobí zároveň s anténním prvkem, a snadné zapojení flíčků do soustav. Nevýhodou tohoto druhu napájení je parazitní vyzařování, které způsobují proudy, protékající mikropásky. Toto vyzařování deformuje směrovou charakteristiku antény.



**Obr. 2-1** Napájení planárních antén a) mikropáskovým vedením a b) koaxiálním kabel.  
Převzato z [2]

Druhou možností, jak napájet planární antény je koaxiální sonda. Její realizace je zobrazena na *obr. 2-1b*) a provede se tak, že střední vodič koaxiálního kabelu se připojí k anténnímu prvku a vnější vodič se spojí s zemnicí plochou. Tento způsob napájení nezpůsobuje parazitní vyzařování, neboli nedeformuje směrovou charakteristiku antény. Jeho nevýhodou je však obtížnější realizace, kdy je nutné vrtat díry do substrátu, a také se hůře spojují jednotlivé flíčky do soustav. [2].

## 2.1 Vícepásmové planární antény

V dnešní době se objevuje velké množství mobilních zařízení, které umožňují používání několika různých komunikačních systémů. Tyto systémy se od sebe většinou liší frekvencemi, na kterých provádějí vysílání a příjem. Typickým představitelem tohoto zařízení jsou mobilní telefony typu MDA, které umožňují jak používání klasických radiotelefonních systémů (GSM, GSM1800 atd.), tak i moderních sítí typu WLAN (Wireless Local Area Network). Tato zařízení také umožňují přenos dat pomocí systému Bluetooth, případně užívání navigačního satelitního systému GPS. Je jasné, že pokud by měl každý z těchto systémů vlastní anténu, stoupla by cena i rozměry takového zařízení, čímž by stal se tento přístroj poněkud nepraktický. Z tohoto důvodu se začaly používat vícepásmové planární antény. Dalšími možnostmi použití vícepásmových planárních antén jsou antény určené ke komunikaci mezi zařízeními standardu Wi-Fi. Tento standard umožňuje vysílání v bezlicenčních pásmech 2,4 GHz a 5GHz.

Vysílání na více frekvencích je možné použít i u základních tvarů planárních antén (čtverec či obdélník, kruh a trojúhelník), je zde ale problém přesného naladění. Pokud bude docházet ke změnám základních rozměrů, budou přeladovány všechny možné frekvence (neboli bude se na nich měnit činitel odrazu na vstupu antény  $S_{11}$ ). Pokud je ale nutné doladit jen jeden z kmitočtů, je nutné zavést do základního flíčku (*patch*) poruchové prvky, kterými je možné ovlivňovat rozložení intenzity magnetického a elektrického pole a tím měnit hodnotu činitele odrazu na vstupu antény neboli přizpůsobovat anténu na požadované kmitočty. [2][5].

## 3 Optimalizace kolonií mravenců

### 3.1 Optimalizace obecně

V technické praxi se často objevuje požadavek optimalizace určitého řešení. Tím je míněna snaha nalézt takové řešení problému, jenž bude co nejlépe vyhovovat daným podmínkám a požadavkům. Požadavky, které při optimalizaci zpracováváme mohou mít různou váhu a dokonce mohou být navzájem protichůdné. Také jich může být značné množství, což dohromady vytváří v technické praxi často se vyskytující stav, že obsah pojmu optimální není jednoznačný. Výsledek tedy není skutečné nejlepší řešení, ale spíše nejlepší možné řešení za daných (často velmi omezujících či dokonce protichůdných) podmínek.

Nejjednodušší optimalizační úlohu si lze představit takto. Máme daný systém, který je definován hodnotami parametrů  $d_1, d_2, \dots, d_n$ . Optimalizovaný systém má určitou, pro nás významnou vlastnost, jejíž míra je hodnotou funkce:

$$Q = f(d_1, d_2 \dots d_n). \quad 3.1$$

Naší úkolem tedy je najít hodnoty parametrů  $d_i$ , při nichž dosahuje funkce  $Q$  maxima či minima. Funkce  $Q$  se pak nazývá účelová nebo také kriteriální funkce (*objective function*). Hodnota funkce kvality  $Q$  vyjadřuje míru dokonalosti systému, respektive kvalitu právě posuzovaného řešení úlohy.

V praxi se často vyskytuje situace, kdy kvalita optimalizovaného systému není určena pouze jednou veličinou. V té chvíli nastává jeden z největších problémů při optimalizaci, kdy je nutné zvolit kriteriální funkci tak, aby globálním způsobem vyjádřila jediným číslem míru přiblížení k námi požadovanému stavu. [5].

### 3.2 Biologické pozadí

Metoda optimalizace pomocí kolonie mravenců je poměrně mladou optimalizační metodou. Vychází ze studia chování skutečných mravenčích kolonií. Mravenčí kolonie představuje decentralizovaný, samoorganizující se systém. Jednotlivý mravenci se řídí souborem jednoduchých pravidel, což vede k tomu, že vzniká komplexní chování celku, schopné řešit i velmi složité optimalizační úlohy.

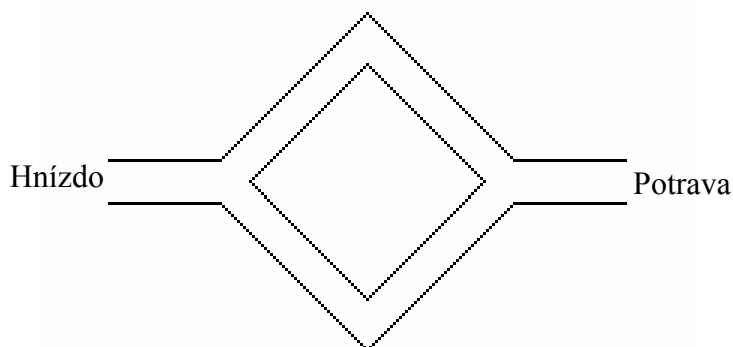
Mravenčí kolonie při hledání nejkratší cesty k potravě využívá kladné zpětné vazby, kdy se drobní a téměř slepí mravenci orientují v prostoru pomocí pomalu se odpařujících

feromonových stop, zanechaných ostatními členy kolonie. Feromonové stopy za sebou zanechává každý mravenec, jenž vyrazí hledat potravu. Pokud na potravu narazí, vrací se po své vlastní stopě zpět do hnízda. Aby bylo zajištěno to, že mravenci budou potravu přinášet z nejbližšího možného místa, má každý mravenec schopnost rozlišovat koncentraci feromonu. Pokud tedy některý člen kolonie narazí na potravu dříve než ostatní, vrátí se také dříve do hnízda a tím zesílí vlastní feromonovou stopu. Protože jeho stopa bude výraznější než ostatní (mravenec ji projde vícekrát a stopa také tolik nevyprchá), dojde díky kladné zpětné vazbě k čím dál častějšímu výběru této cesty, až zcela převáží. Průběžnému vyprchávání feromonu také umožňuje částečné zapomínání, což zabraňuje konvergenci řešení do lokálního extrému. [4].

### 3.2.1 Experiment s dvojitým mostem

Impulsem ke zkoumání chování mravenčí kolonie byly experimenty z počátku 90. let kolektivu vědců okolo profesora Deneubourga, kteří použili argentinský druh mravenců *Linepithema humile* k experimentům se dvěma mosty. Smysl experimentu byl v tom, že na jeden konec mostu byly umístěni mravenci a na druhý jejich potravina. Před začátkem experimentu není ani na jednom rameni mostu žádný feromon.

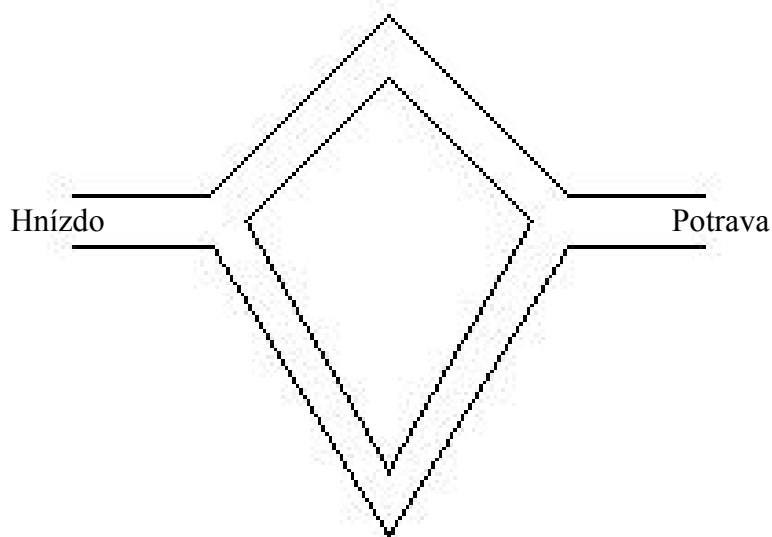
První část experimentu probíhala s mostem, který měl obě ramena stejně dlouhá. Jeho náčrt je na *obr. 3-1*. Cesta k potravě tedy mravenců trvá stejně dlouho, ať už si vyberou kteroukoliv z cest a tedy uložené množství feromonu by mělo být stejné v obou ramenech a mravenci by měli proudit oběma rameny rovnoměrně. Ve skutečnosti ovšem dojde k tomu, že si na začátku vybere jednu z cest větší množství mravenců. Nyní se projeví kladná zpětná vazba, a dojde k situaci, že cesta s větším množstvím mravenců převáží. Druhá cesta nakonec zůstane nevyužita.



**Obr. 3-1** Most se stejnými rameny.

V druhé části experimentu byl použit most s nestejně dlouhými rameny. Příklad takového mostu je na *obr. 3-2*. Je celkem jasné, že mravenci, kteří si vyberou kratší cestu, se vrátí do hnízda s potravou dříve, než mravenci, kteří zvolili rameno delší. Krátké rameno tedy postupně převáží a mravenci se budou pohybovat pouze po něm. Mohou ovšem nastat zvláštní případy. První je případ, kdy si delší rameno vybere výrazně více mravenců než kratší. V té chvíli bude dlouhé (a tedy pro mravence hledající nejkratší cestu k potravě zcela nevhodné) rameno více poznamenáno feromonem a mravenci si pak k cestě volí stále více delší rameno. Tuto vlastnost by mělo odstranit vypařování feromonu, které je ovšem daleko pomalejší než je obvyklá doba trvání pokusů. Znamená to, že systém založený pouze na feromonu by v některých případech nebyl dostatečně flexibilní, zvláště v případech, kdy je kratší rameno přidáno až po začátku pokusu.

Existuje ovšem určitý druh mravenců, kteří vykazují vlastnost, která jim umožňuje najít kratší cestu, i když je do systému přidána až později. Pokud se takový mravenec nachází přibližně v polovině dlouhého ramena a zjistí, že směřuje téměř kolmo k požadovanému směru, otočí se a zamíří zpět. Taková kolonie je pak velmi flexibilní díky využití kombinace individuální paměti směru a kolektivního sledování cesty. [4].



**Obr. 3-2** Most s různě dlouhými rameny.

### 3.3 Umělé mravenci

Pro účely optimalizace planární antény samozřejmě není možné používat skutečné mravence, ale je nutné převést chování kolonie do algoritmů. K tomuto účelu je nutné vytvořit umělé mravence, kteří se v některých vlastnostech shodují a v některých liší od skutečných. Rozdíly vznikly posílením některých vlastností umělých mravenců tak, aby lépe splňovali požadavky na zlepšení výsledků algoritmů, řešících konkrétní optimalizační problémy.

Podobné vlastnosti se skutečnými mravenci:

- kolonie kooperujících mravenců
- feromonová stopa a nepřímá komunikace mravenců pomocí ní
- pravděpodobnostní rozhodování, lokálnost strategie

Rozdílné vlastnosti oproti skutečným mravencům:

- diskrétní svět
- vnitřní stavy – osobní paměť zaznamenávající dosud vykonané akce
- nejsou zcela slepí
- množství zanechaného feromonu je funkcí kvality nalezeného řešení
- problémově závislé časování ukládání feromonu

[4].

### 3.4 Algoritmus optimalizace

Postup řešení při optimalizaci je vcelku prostý. Na začátku jsou dány 2 a více vstupních proměnných (jedna vstupní proměnná je spíše záležitostí parametrické analýzy, proto tento případ nebude v dalším textu uvažován), které představují rozměry antény, které chceme zapojit do optimalizace. Počet těchto proměnných si označíme  $N$ . Aby bylo možné použít algoritmus, jenž je popsán dále, je nejdříve nutné vytvořit pomocí těchto rozměrů matici kritériálních funkcí. Pokud máme 2 rozměry, jenž budou použity při optimalizaci ( $N = 2$ ), bude postup následující. Nejprve vygenerujeme 2 vektory, jenž budou obsahovat jednotlivé rozměry posunuté o určitý krok. Délka těchto vektorů je dána počtem kroků a může i nemusí být pro oba rozměry shodná. Nakonec spojíme oba vektory v trojrozměrnou matici rozměrů (délka 1. vektoru x délka 2. vektoru x 2 – hodnoty rozměrů v jednotlivých krocích),

čímž získáme všechny možné kombinace jednotlivých prvků (rozměrů), jenž jsou obsaženy ve vektorech. Nyní se provede analýza pro jednotlivé kombinace rozměrů a následně výpočet kritériální funkce, čímž vznikne dvourozměrná matice kritériálních funkcí (délka 1. vektoru x délka 2. vektoru).

Pokud je dáno více vstupních proměnných, jsou možné dva způsoby realizace matice rozměrů a matice kritériálních funkcí. První je analogický s předchozím, pouze s tím rozdílem, že vytvořené matice obsahují s každou další vstupní proměnou rozměr navíc, tedy pro  $N = 3$  je matice rozměrů čtyřrozměrná a matice kritériálních funkcí trojrozměrná atd. Tento způsob je ovšem velmi náročný na čas výpočtu, protože s každou další vstupní proměnou přibývá počet prováděných analýz násobně s délkou vektoru rozměrů. Díky tomu by bylo nutné pro 3 vstupní proměnné pouze s deseti kroky rozmítání rozměru provést 1000 analýz. Vhodnější způsob je ten, že zůstaneme u trojrozměrné matice rozměrů a tím dvourozměrné matice kritériálních funkcí. Velikost matice rozměrů pak bude délka 1 x délka 2 x  $N$ . Délky 1 a 2 jsou určité, uživatelem definované konstanty, které po vynásobení představují počet analýz, které budou provedeny. Naplnění matice rozměrů se pak provádí generováním náhodných čísel z uživatelem daného rozsahu vstupních proměnných (rozměry antény). Po naplnění matice se shodně s předchozím případem provedou analýzy a výpočet kritériální funkce. Nevýhodou tohoto způsobu je náhodnost generovaných rozměrů, které se nemusí trefit do ideálního řešení, a dále neschopnost reprodukovatelnosti výsledků.

Nyní je možné přistoupit k umístění mravenců. Každý mravenec je definován svojí polohou v matici kritériálních funkcí, neboli  $x$  a  $y$  souřadnicemi (případně dalšími při použití více rozměrů). Tyto souřadnice definují jednak hodnotu kritériální funkce, a jednak jednotlivé rozměry antény, kterou optimalizujeme.

Po umístění mravenců následuje spuštění vyhledávání nejlepšího řešení. Každý mravenec se v každé iteraci rozhoduje, do kterého z okolních uzlů se přesune. Tento přesun se provádí vždy, i když je současné řešení (tedy místo, kde mravenec stojí na začátku iterace) lepší než všechny okolní body. Kritériem přechodu je pravděpodobnostní funkce [viz. 9]:

$$p_{i,j}(t) = \frac{[\tau_j(t)]^\alpha \cdot [\eta_j]^\beta}{\sum_{l \in \Theta_i} [\tau_l(t)]^\alpha \cdot [\eta_l]^\beta} \quad (3.1)$$

V tomto vztahu předsazuje  $p$  pravděpodobnost přechodu mravence z uzlu  $i$  (tady místa, kde se právě nachází) do místa  $j$ . Proměnná  $t$  nepředstavuje v tomto případě čas, ale iteraci, v které rozhodování probíhá. Každý z dostupných uzlů je ohodnocen podle 2 kritérií.



Prvním je hodnota feromonu v uzlu  $j$ , což je vyjádřeno parametrem  $\tau_j(t)$ . Druhým parametrem je kritériální funkce  $\eta_j$ . Jak hodnota feromonu, tak i kritériální funkce jsou umocněny na  $\alpha$  a  $\beta$ . Tyto parametry jsou konstanty, kterými je možné zajistit preferování kritériální funkce či feromonu. Samozřejmě je možné použít oba parametry shodně, a tím zajistit, že se mravenec použije při rozhodování stejnou váhu pro obě funkce.

Ve jmenovateli je pak suma všech dostupných uzlů. Samozřejmě platí základní premisa z pravděpodobnosti, tedy že suma pravděpodobností všech dostupných bodů je rovna jedné.

V této fázi jsme z relativně hloupého a prakticky slepého mravence vytvořili inteligentní objekt, který je nejdříve prozkoumává své okolí (tedy není slepý) a pak se vcelku inteligentně rozhodne, kam půjde dál. Nyní je ještě nutné zajistit základní chování mravenců, což je zanechávání feromonu na místech, kudy prošel. Feromon bude zanecháván podle následujícího vztahu [viz. 9]:

$$\tau_j(t+1) = \tau_j(t) + \Delta\tau_j(t) - d(t). \quad (3.2)$$

Tento vzorec nám říká, že následující hodnota feromonu je rovna předchozí, ke které je přičten feromonový dodatek  $\Delta\tau_j(t)$  a odečtena feromonová trvalost  $d(t)$ . Feromonová trvalost představuje parametr, který zajišťuje postupné vyprchávání feromonu. Díky tomu se částečně zabrání uváznutí mravenců v lokálním extrému. Její výpočet se provádí takto [viz. 9]:

$$d(t) = \begin{cases} \rho & \text{pro } \text{mod}\left(\frac{t}{\gamma}\right) = 0 \\ 0 & \text{pro } \text{mod}\left(\frac{t}{\gamma}\right) \neq 0 \end{cases}. \quad (3.3)$$

Pro výpočet se používají dva parametry. První je  $\rho$ , neboli koeficient feromonové eliminace za periodu. Tato hodnota nám říká, o kolik se sníží feromon za jednu periodu. Druhý je  $\gamma$ , což je právě perioda feromonové eliminace. Touto hodnotou určujeme, po jaké době k eliminaci dojde. Parametr  $t$  nám opět představuje jednotlivé iterace.

Správné nastavení všech parametrů je jeden ze základních předpokladů pro získání správného řešení. Při špatně zvolených hodnotách může dojít k tomu, že si mravenci budou vybírat pro nás ne příliš vhodné cesty, či bude docházet k přílišnému či nedostatečnému vyprchávání feromonu, což může mít za následek uváznutí v lokálním extrému.

Nyní je nutné tento postup vložit do algoritmu, který využijeme k počítačovému zpracování. Uvažujme 2 vstupní proměnné. Postup řešení bude následující:

**For**  $i = 1$  **To**  $i_{\max}$  **Do**

**For**  $j = 1$  **To**  $j_{\max}$  **Do**

        vytvoření matice rozměrů (zde 2 rozměrná);

        vypočtení kritériální funkce pro dané rozměry;

**End For**

**End For**

**For**  $k = 1$  **To**  $m$  **Do**

    umístění mravenců ( $m$  je jejich počet);

    do jejich osobní nejlepších hodnot se uloží místo, kde se nachází;

**End For**

**For**  $t$  **To** počet\_iterací **Do**

**For**  $k = 1$  **To**  $m$  **Do**

        prohledání okolních uzlů;

        výpočet pravděpodobnosti přechodu;

        výběr místa s nejvyšší pravděpodobností;

        porovnání předchozí osobní nejlepší hodnoty se současnou kritériální funkcí;

        porovnání paměti mravence s dříve navštívenými uzly;

**If**  $bestm < krit$  **Then**

$bestm = krit$

**End If**

**End For**

**End For**

**For**  $k = 1$  **To**  $m$  **Do**

    z vektoru osobních maxim se vybere to nejvyšší => globální maximum;

**End For**

Vzhledem k tomu, že může snadno nastat situace, že se mravenec bude pohybovat pouze mezi 2 body, je vhodné mu doplnit paměť s uzly, kterými už prošel a do kterých bude mít zakázán přechod. Díky tomu zajistíme, že mravenci prohledají skutečně celou matici s výsledky. Délka paměti závisí především na velikosti prohledávané matice kritériální funkcí. Pokud nastavíme paměť příliš dlouhou, může nastat situace, že mravenec si bude pamatovat všechny okolní body a díky tomu se nepřesune ze stávající pozice. Pokud naopak nastavíme paměť příliš krátkou, může nastat situace, že mravenec uvázne v okolí lokálního extrému a díky tomu nenalezne skutečně nejlepší řešení. [4].

## **4 Substráty s elektromagnetickými zádržnými pásmy**

### **4.1 Historie výzkumu periodických struktur**

Elektromagnetické materiály se zádržnými pásmy (EBG – Electromagnetic Bandgap) patří mezi periodické struktury. Tento typ struktur se nalézá všude kolem nás, a to jak v neživé objektech (např. krystal je prostředí tvořené opakujícími se částicemi), tak i živých organismech. První popis jevů, které se odehrávají v periodických strukturách, se objevil v roce 1912, kdy Bragg dokázal, že šíření rentgenového záření v krystalu je možné pouze při splnění určitých podmínek. Pokud tyto podmínky nejsou splněny, dojde odražení tohoto záření. Chování elektronů v krystalech pak bylo popsáno Schroedingerovou rovnicí a zjistilo se, že elektrony mohou nabývat pouze určitých energetických stavů. Dalším krokem při výzkumu periodických struktur byl rok 1956, kdy Brillouin a Parodi popsali šíření mechanických vln v těchto strukturách a ukázali na analogii mezi mechanickými a elektrickými jevy.

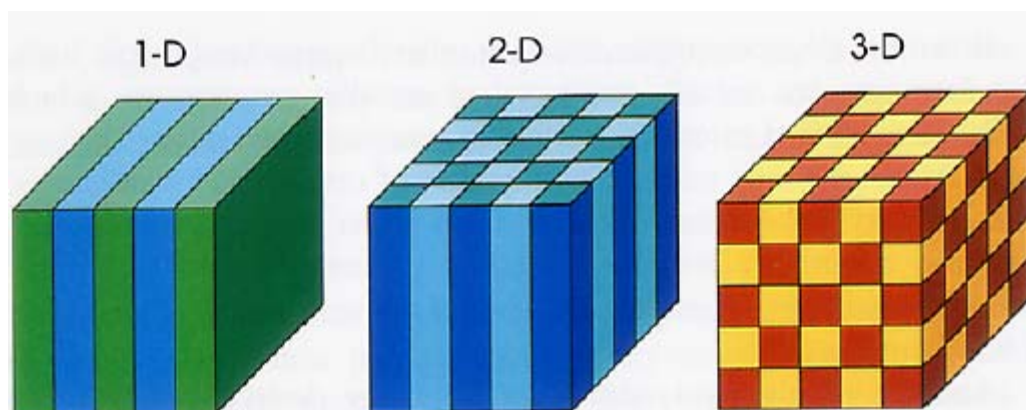
V současné době získávají periodické struktury na významu v mnoha oblastech mikrovlnné techniky. Využívají se například ke zvyšování zisku planárních antén, realizaci směrových antén či pro filtraci. [8]

### **4.2 Periodické struktury a jejich analýza**

Pokud mluvíme o periodických strukturách v elektrotechnice, je tím myšleno takové prostředí, ve kterém dochází k periodické změně elektrických vlastností. Konkrétně jde o změnu permitivity, permeability a vodivosti. Pokud na takovéto prostředí bude dopadat elektromagnetická vlna, zjistíme, že dochází k silné disperzi a že ve spektru vznikají propustná a zádržná pásma. Toto chování je způsobeno iteracemi mezi dopadající vlnou a vlnami odraženými. Ke vzniku tohoto jevu je ovšem zapotřebí, aby vlnová délka dopadající vlny byla srovnatelná s periodou struktury. Pokud tato podmínka není splněna a dopadající vlna má mnohem vyšší vlnovou délku než je perioda struktury, začne docházet k odlišným jevům. Vzhledem k tomu, že takovýto případ není tématem této diplomové práce, zabývat se jím nadále nebudeme.

Základní rozdělení periodických struktur je realizováno podle počtu rozměrů, ve kterých dochází k periodičnosti struktury. Je tedy celkem jasné, že jde o jednorozměrné,

dvourozměrné a třírozměrné periodické struktury. Periodičnosti v daném počtu rozměrů se dosahuje vkládáním dielektrických či vodivých tělísek vloženými do daného prostředí.



**Obr. 4-1** Ukázka jedno, dvou a trojrozměrného elektromagnetického krystalu. Převzato z[6]

Ukázka jedno, dvou a trojrozměrného elektromagnetického krystalu je zobrazena na obr. 4-1, kde jsou barevně odlišeny různé hodnoty permitivity. V praxi jsou příkladem jednorozměrné periodické struktury otvory periodicky vyleptané v zemní rovině pod mikropáskem, dvourozměrná struktura se dá vytvořit rovnoběžnými vodivými či dielektrickými válečky ekvidistantně umístěnými do prostředí a nakonec trojrozměrná struktura vznikne, pokud periodicky vyvrtáme do dielektrika otvory pod určitým úhlem („Yablonovite“).

Pokud provádíme analýzu periodických struktur, je naším hlavním cílem zjištění disperzního diagramu této struktury. Disperzní diagram vyjadřuje chování periodické struktury v různých oblastech kmitočtového spektra a je grafickým zobrazení tzv. disperzní rovnice. Tato rovnice dává do souvislosti frekvenci  $f$  (případně úhlovou frekvenci  $\omega$ ) a fázovou konstantu šířící se vlny  $\beta$ , což je reálná část konstanty šíření  $k$ . Fázová konstanta je vynesena na osu  $x$  a na osu  $y$  je vynesena frekvence. Takto zobrazené křivky pak odpovídají jednotlivým vidům elektromagnetických vln, jenž se mohou šířit v periodické struktuře, a nazývají se Blochovy vidy. Z hotového disperzního diagramu je možné vyčíst informace, které charakterizují danou periodickou strukturu. Konkrétně se jedná o umístění propustných a zádržných pásem, počet vidů vybuzených na dané frekvenci, hodnotu fázové a skupinové rychlosti atd. Pokud provádíme analýzu dvourozměrných struktur, použijeme ke zpracování výsledků také disperzní diagram, ovšem s tím rozdílem, že na osu  $x$  umístíme složky fázové konstanty ve směrech os souřadného systému a místo jednotlivých křivek zobrazíme plochy, které odpovídají jednotlivým vidům. [6]. [8].

### 4.2.1 Analýza jednorozměrných periodických struktur

Jako jednorozměrnou periodickou strukturu budeme uvažovat nekonečnou řadu diskontinuit. Jednotlivé prvky této řady budou od sebe vzdáleny o vzdálenost  $d$  a jsou kopií tzv. elementární buňky. I když při analýze uvažujeme nekonečný počet prvků, je realizace takovéto struktury samozřejmě nemožná. Abychom dosáhli alespoň přibližných vlastností periodické struktury, stačí použít přibližně pět prvků.



**Obr. 4-2** Jednorozměrná periodická struktura

Frekvence, jenž se šíří tímto prostředím, je periodickou funkcí fázové konstanty a opakuje se v závislosti na vlnovém vektoru s periodou  $2\pi/d$ . Při analýze se omezujeme na interval  $-\frac{\pi}{d} \leq \beta \leq \frac{\pi}{d}$ , protože hodnoty fázové konstanty, které se liší o výše zmíněnou periodu, jsou fyzikálně nerozlišitelné. Interval, ve kterém provádíme analýzu se nazývá první Brillouinova zóna. Vyšší Brillouinovy zóny jsou pouze kopií částí této první Brillouinovy zóny.

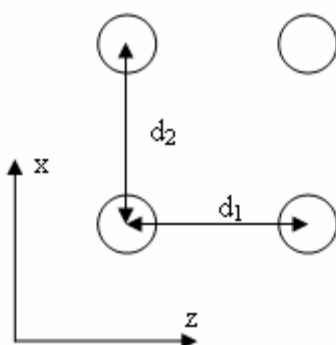
Je možné dokázat, že na hranicích Brillouinových zón je skupinová rychlost šířící se vlny nulová, což odpovídá stojatému vlnění. Vlna se tedy na hranicích nešíří a je odražena, což je způsobeno vícenásobnými odrazy od diskontinuit a interferencemi. Tento jev se nazývá Braggův rozptyl a nastane při splnění podmínky (viz [8]):

$$\beta = \frac{\pi}{d} \Leftrightarrow \lambda_g = 2 \cdot d, \quad (4.1)$$

kde  $\lambda_g$  je vlnová délka na struktuře. Této podmínce pak také odpovídá frekvence  $f_B$ , což je taková frekvence, v jejímž okolí se v disperzním diagramu nenachází žádná křivka. Pak hovoříme o takzvaném zádržném pásmu, které od sebe odděluje jednotlivá propustná pásma daná jednotlivými Blochovými vidy. V anglické literatuře se tato pásma označují výrazem *Band Gap* a celé struktury, jenž využívají Braggova rozptylu, se pak nazývají *Photonic Band Gap* (PBG) či *Electromagnetic Bandgap* (EBG). [8].

### 4.2.2 Analýza dvourozměrných periodických struktur

Analýza dvourozměrných periodických struktur je zobecněním analýzy jednorozměrných. Diskontinuita budou nyní seřazena v mřížku v dvourozměrném, tzv. přímém prostoru (souřadný systém s osami  $x$  a  $z$ ). Rozteč mezi diskontinuitami je určena pomocí tzv. základních mřížových vektorů  $d_1$  a  $d_2$ . Nákres dvourozměrné periodické struktury s čtvercovou mříží je zobrazena na obr. 4-3. Pro zjednodušení jsou zde zobrazeny pouze 4 buňky.



**Obr. 4-3** Nákres dvourozměrné periodické struktury s čtvercovou mříží

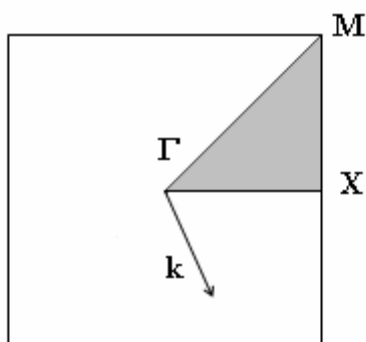
Při analýze zobecníme fázovou konstantu na dvourozměrný vlnový vektor  $k$ . Tento vektor leží v tzv. recipročním prostoru, jenž je určen souřadnou soustavou s osami  $k_x$  a  $k_z$ . Tyto osy představují složky vlnového vektoru ve směru os  $x$  a  $z$  přímého prostoru. Reciproká mříž je definována pomocí základních vektorů reciproké mříže  $b_1$  a  $b_2$ , které jsou se základními mřížovými vektory provázány vztahem:

$$d_p \cdot b_q = 2\pi \cdot \delta_{pq} \quad \delta_{pq} = \begin{cases} 0 & \text{pro } p \neq q \\ 1 & \text{pro } p = q \end{cases} \quad (4.2)$$

Také ve dvourozměrném recipročním prostoru se definují Brillouinovy zóny. První zóna je určena nejmenším mnohoúhelníkem, jenž je vytvořen okolo počátku a jenž je vymezen souborem přímek procházejících kolmo středy vektorů, které spojují počátek s uzly reciproké mříže. Disperzní diagram dvourozměrných struktur se vytvoří jako plochy, které se vynesou nad dvourozměrný reciproký prostor. Tyto plochy pak odpovídají jednotlivým Blochovým vidům. Disperzní diagram je pak definován jako závislost frekvence na velikosti a směru vlnového vektoru.

Stejně jako v případě jednorozměrné periodické struktury je i zde frekvence vln šířících se dvourozměrnou periodickou strukturou periodickou funkcí. Tentokrát ovšem závisí na dvou proměnných a to  $k_x$  a  $k_z$ . Pokud provedeme redukci disperzního diagramu na první Brillouinovu zónu, zjistíme, že se v něm stále nacházejí nadbytečné informace. Pro úplný popis vlastností struktury postačuje vzít v úvahu pouze tzv. nedělitelnou Brillouinovu zónu. Její náčrt je zobrazen na *obr. 4-4*.

Zbývající část první Brillouinovy zóny pak tvoří identické kopie této nedělitelné zóny. Správně by měl být výstupem analýzy trojrozměrný graf, což by ovšem mohlo působit poněkud nepřehledně. Proto se k zobrazení používá pouze dvourozměrných disperzních diagramů, kde se mění vlnový vektor po hranicích nedělitelné Brillouinovy zóny mezi jejími krajními body. Tyto body se označují jako  $\Gamma$ , M a X. Příklad takového disperzního diagramu je zobrazen v kapitole X na *obr. Y*. Z takového disperzního diagramu je poté možné snadno určit pro libovolný směr šíření v rovině  $xz$  vlastnosti periodické struktury. [8].



**Obr. 4-4** Nedělitelná Brillouinova zóna (zvýrazněná výseč)

### 4.2.3 Analýza trojrozměrných periodických struktur

Analýza trojrozměrných periodických struktur je analogií s analýzou dvourozměrných. Dochází při ní k rozšíření ze dvourozměrného přímého i reciprokého prostoru na trojrozměrný. Disperzní diagram se pak používá pouze ve variantě s nedělitelnou Brillouinovou zónou. Vzhledem k tomu, že analýza a použití tohoto druhu struktur není tématem této práce, nebudeme se jí již dále zabývat. [8].



## 5 Praktická část

V této části je aplikována výše popsaná optimalizace kolonií mravenců na dva modely planárních antén. Tyto modely byly vytvořeny v rámci předcházejících semestrálních projektů v programu *CST Microwave Studio*. Nejprve je rozebráno konkrétní nastavení naprogramované metody v jazyce *VBA* (zdrojový kód je uveden v příloze) jako například hodnoty jednotlivých koeficientů či vztah pro výpočet kritériální funkce. Všechny optimalizace byly prováděny s cílem co nejvíce přizpůsobit anténu na požadované frekvence, neboli bylo cílem získat co nejnižší hodnotu činitele odrazu na vstupu antény  $S_{11}$ . U druhého typu planární antény je posléze nahrazen standardní typ substrátu substrátem s elektromagnetickými zádržnými pásmy (EBG). Jsou zde prezentovány 2 typy mřížek a to čtvercová a trojúhelníková.

### 5.1 Nastavení optimalizační metody kolonie mravenců

Z rozboru optimalizace kolonií mravenců z teoretické části je jasné, že je nutné provést nastavení určitých proměnných. Toto nastavení je shodné pro obě následující antény a proto bude rozebráno už nyní. Prvním krokem je nastavení počtu kroků pro jednotlivé rozměry (v obou případech jsou použity dvě vstupní proměnné). Tento parametr je sice individuální pro každou anténu, ovšem pro zjednodušení se krokují oba rozměry stejným počtem kroků. To znamená, že matice kritériálních funkcí bude čtvercová.

Prvním krokem je určení konstant  $\alpha$  a  $\beta$  do vztahu 3.1. Vzhledem k tomu, že je naším cílem nalézt rozměry co nejbližší námi požadovaných frekvencí, je vhodné upřednostnit při počítání pravděpodobnosti přechodu kritériální funkci před množstvím feromonu v sousedních uzlech. Proto nastavíme parametr  $\alpha$  na hodnotu 1 a parametr  $\beta$  na hodnotu 30.

Nyní se naskytá otázka, jakým způsobem stanovit hodnotu kritériální funkce. Tato funkce musí být vzhledem k výpočtu pravděpodobnosti přechodu do dalšího uzlu co nejvyšší a zároveň by měla co nejlépe postihnout jak odchylku frekvencí, tak i hodnotu činitele odrazu na vstupu antény  $S_{11}$ . Pro optimalizaci následujících antén byla zvolena kritériální funkce takto:

$$\eta = \frac{k}{(f_{p1} - f_{s1})^2 + (f_{p2} - f_{s2})^2} . \quad (5.1)$$

Ve jmenovateli je řešen rozdíl mezi požadovanou a skutečnou frekvencí. Jako skutečná frekvence je brána frekvence minima  $S_{II}$  v okolí požadované frekvence. Okolí frekvence je omezeno  $\pm 0,1$  GHz. Umocnění rozdílu je zde proto, aby byly eliminovány záporné výsledky, a zároveň slouží ke zdůraznění větších rozdílů na jedné z frekvencí. Nabízí se otázka, jakým způsobem zabezpečit při výpočtu situaci, že anténa je naladěna přesně. V takovém případě totiž dojde k dělení nulou, což způsobí pád optimalizace. Vzhledem k tomu, že CST vrací při dotazu na frekvenci v naprogramované optimalizaci hodnotu s přesností na tři desetinná místa (tedy na 1 MHz v našem případě), je nejmenší možná hodnota jmenovatele při „nepřesném“ naladění (pokud se dá u odchylky 1 MHz vůbec mluvit o nepřesnosti) jen jedné frekvence  $10^{-6}$ . V takovém případě tedy stačí, pokud zavedeme podmínku na rovnost skutečných a požadovaných frekvencí (obou), při jejímž splnění bude za jmenovatel dosazena hodnota  $0,5 \cdot 10^{-6}$ . Díky tomu získáme vyšší hodnotu kritériální funkce než při nepřesném naladění. Zároveň je možné srazit tuto hodnotu při nevhodném přizpůsobení až na 20 000 ( $0,01/0,5 \cdot 10^{-6}$ ), což je méně, než kolik dosahujeme při běžných výsledcích (bude ukázáno dále), které se dají považovat za dostačující. Díky tomu bude řešení s přesným naladěním kmitočtů ale s nevhodnými hodnotami přizpůsobení nahrazeno v paměti osobních maxim mravence vhodnějším výsledkem (pokud existuje a mravenec na něj narazí).

Dalším krokem je stanovení, zde má anténa na skutečných frekvencích dostatečnou hodnotu přizpůsobení. K tomu slouží parametr  $k$ . Pokud je hodnota  $S_{II}$  na obou skutečných frekvencích nižší (tedy lepší) než -10 dB, je parametr  $k$  nastaven na hodnotu 10. Pokud se dostaneme s  $S_{II}$  na některé z frekvencí mezi -10 a -5 dB, nastaví se  $k$  na hodnotu 1. Je to proto, aby nám optimalizační algoritmus vzal v úvahu i hodnoty s sice horším přizpůsobením, avšak odpovídající frekvenčně. Zlepšení činitele odrazu na vstupu je pak možné provést např. změnou umístění napájení. Nakonec pokud na některé frekvenci získáme  $S_{II}$  větší než -5 dB, je takovýto výsledek degradován tím, že se parametr  $k$  nastaví na hodnotu 0,01. Díky tomu eliminuje výsledky, kdy se v prohledávaném intervalu nenachází skutečné minimum, ale pouze určité zvlnění. Samozřejmě je možné provést podrobnější nastavování konstanty  $k$  pro  $S_{II}$  nižší než -10 dB (např. ještě pro -20 dB, -30 dB...), nutné to ovšem není.

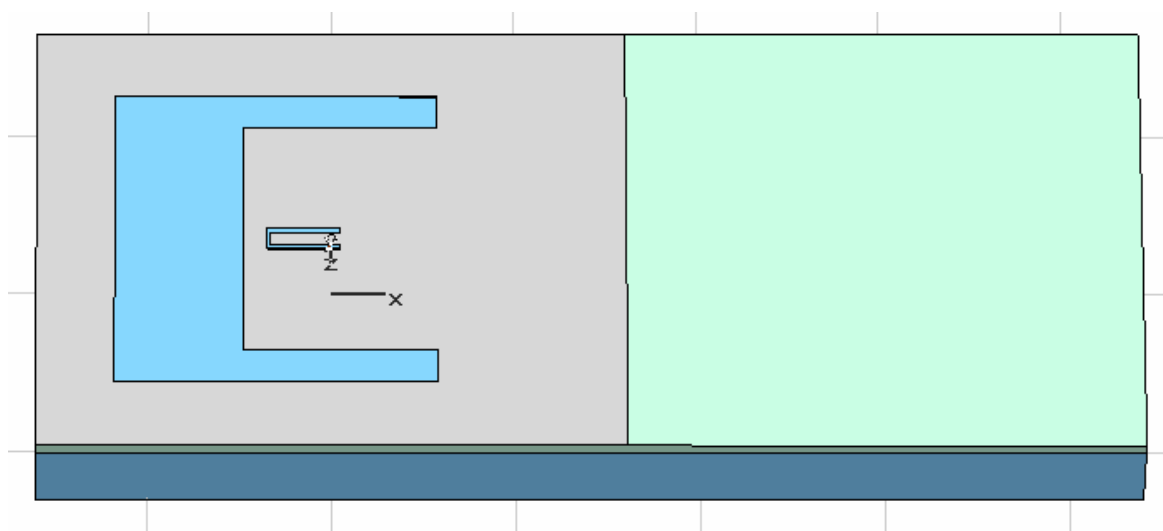
Dalším krokem je stanovení konstant pro vyprchávání feromonu do vztahu 3.2 a 3.3. Nejprve je nutné stanovit, za jak dlouho vyprchá feromon, neboli periodu feromonové eliminace  $\gamma$ . Vzhledem k malému významu feromonu a také kvůli snaze zamezit hromadění mravenců v okolí lokálního extrému byla zvolena poměrně krátká a to 5. Koeficient eliminace je nastaven na 1. To tedy znamená, že po 5 iteracích se sníží hodnota feromonu o jedničku. Feromonový dodatek, který se zapisuje v každém přechodu je roven také 1.

V neposlední řadě je nutné nastavit délku paměti mravenců. Tato hodnota je závislá na počtu iterací, který se zase odvíjí od počtu prováděných analýz, který se u obou antén lišil, bude tato hodnota vždy zmíněna zvlášť v další textu. Obecně je ale možné říci, že délka paměti mravence by měla být přibližně jednou pětinou počtu iterací (nebo též zhruba jednou desetinou počtu provedených analýz) a rozhodně by neměla klesnout pod 5. Při kratší paměti mravenci uvážnou v okolí lokálního extrému, pokud použijeme délku paměti mnohem vyšší než jedna pětina počtu iterací, nastane dost často situace, že mravenec je zablokovan v dalším pohybu.

Posledním parametrem je, kolik mravenců bude prohledávat matici kritériálních funkcí. Zde bylo zvoleno 9 mravenců. Tento počet je dán pravidelným umístěním mravenců v matici kritériálních funkcí, kdy jsou umístěny na hranách této matice (v rozích matice a dále ve středu každé hrany) a jeden je umístěn do jejího středu.

## 5.2 Vícepásmová planární anténa se dvěma U-štěrbínami

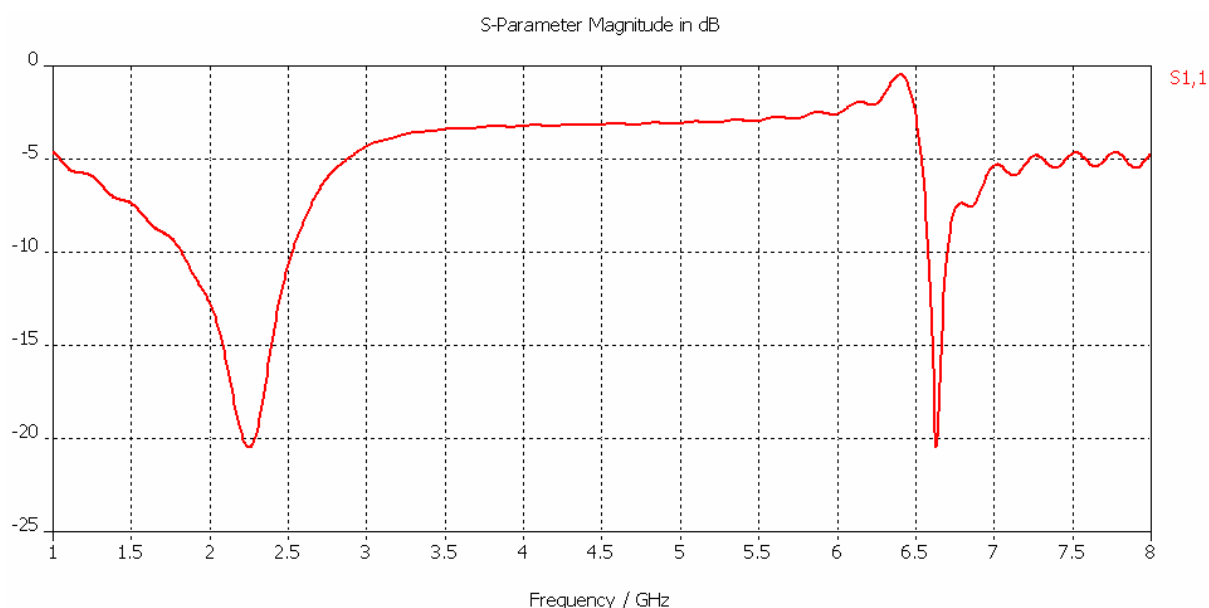
Optimalizace této antény byla řešena v semestrálním projektu 2, kde byly porovnávány optimalizační metody dostupné v CST Microwave Studio s optimalizací pomocí kolonie mravenců. Vzhledem k tomu, jsou zde uvedeny pouze některé výsledky. Návrh této antény je zobrazen na *obr. 5-1*. Jde o zobrazení z návrhového prostředí *CST Microwave Studio*. Tato anténa se skládá ze substrátu, který je umístěn na vzduchové mezeře. Na tomto substrátu je nanesen flíček (*patch*), ve kterém jsou umístěny dvě štěrbiny ve tvaru písmene U.



**Obr. 5-1** Návrh antény se dvěma U-štěrbínami

Vnější štěrbinou je možné ovlivňovat nižší frekvenci, na které chceme provádět vysílání. Vnitřní štěrbinou pak ovlivňujeme výši frekvenci. Změna rozměrů některé ze štěrbin má ale vliv i na druhou frekvenci, na které chceme provádět vysílání. Tento vliv je ovšem menší a často se týká pouze úrovně, které dosáhne hodnota parametru  $s_{11}$ . Napájení antény se provádí koaxiální sondou, která je umístěná ve středu flíčku.

Pro simulaci této antény byl použit jako materiál substrátu Duroidu 5880<sup>TM</sup>. Jeho rozměry jsou 52x120 mm. Šířka vzduchové mezery, na níž je substrát umístěn je 10 mm. Vlastní flíček nanesený na substrátu má délku 64 mm. Vnější štěrbina je umístěn ve vzdálenosti 8,5 mm od užšího okraje substrátu a má délku 35 mm. Jeho šířka je 36 mm. Ramena vnější U-šterbiny jsou široká 4 mm, spodní část 14 mm. Vnitřní U-šterbina je umístěna 25 mm od užšího okraje substrátu a má parametry: délka 8 mm, šířka celého 2,6 mm, šířka ramen 0,6 a šířka spodní části 0,3 mm. Obě šterbiny jsou symetrické podle osy x (osa x je rovnoběžná s delší hranou substrátu).



**Obr. 5-2** *Průběh činitele odrazu na vstupu antény pro anténu se dvěma U-šterbinami – základní rozměry*

Po provedení analýzy byl získán průběh činitele odrazu na vstupu antény, jenž je zobrazen na obr. 5-2. Z výsledků je vidět, že anténa sice dosahuje dobrých hodnot  $S_{11}$ , ovšem na nevhodných frekvencích. Konkrétně je to:

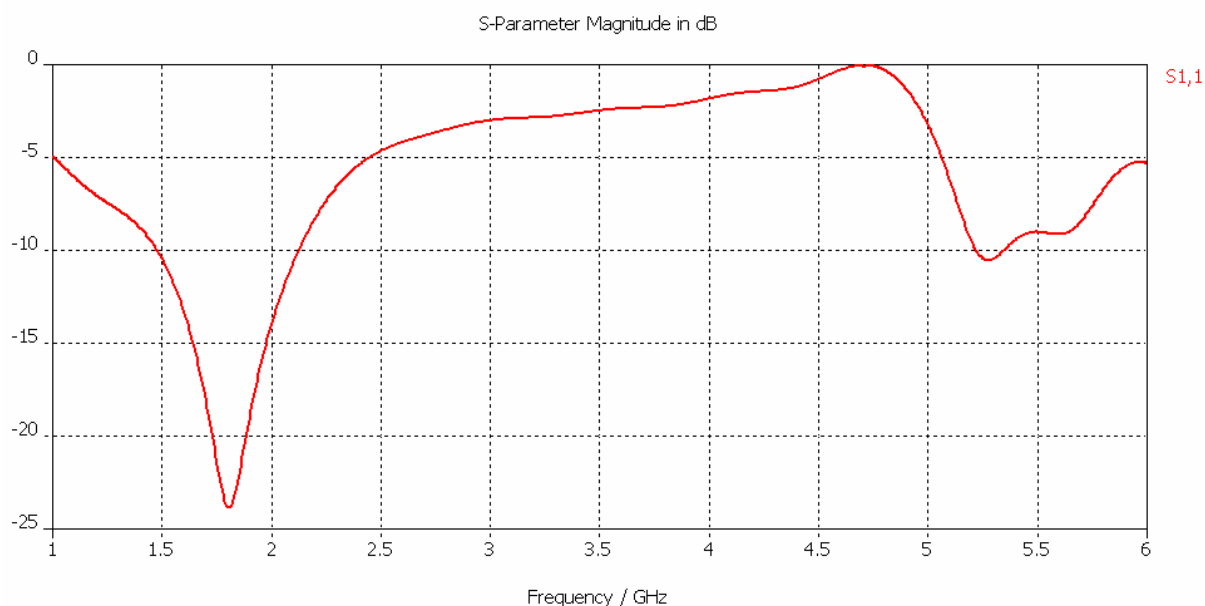
- $S_{11} = -20,431$  dB pro  $f_1 = 2,253$  GHz
- $S_{11} = -20,42$  dB pro  $f_2 = 6,635$  GHz

### 5.2.1 Optimalizace kolonií mravenců

Cílem bylo přizpůsobit anténu na kmitočty 1,8 GHz a 5,3 GHz. Tyto kmitočty představují frekvence, na kterých vysílá například GSM1800 a HyperLAN 2. Pro optimalizaci byly zvoleny dva rozměry a to konkrétně délka ramen poruchových štěrbin. Optimalizace byla prováděna v rozmezí délek 35 až 45 mm pro délku vnější štěrbin a 8 až 13 mm pro délku vnitřní štěrbin. Krok pro optimalizaci kolonií mravenců byl 1 mm a 0,5 mm, což znamená, že každý rozměr byl nakrokován 10krát. Díky tomu je nutné provést 100 analýz. Počet iterací, které jsou použity pro prohledávání výsledků, byl nastaven na 50. Délka paměti mravenců pak byla stanovena na 10 předchozích iterací.

Výsledný průběh hodnot  $S_{11}$  v decibelech po provedení optimalizace kolonií mravenců je uveden na *obr. 5-3*, a odpovídá rozměrům 40 mm pro délku vnější štěrbin a 11 mm pro délku vnitřní. Je z něho patrné, že se podařilo zoptimalizovat anténu na požadované frekvence, ovšem za cenu mírného zhoršení hodnot přizpůsobení. Konkrétně:

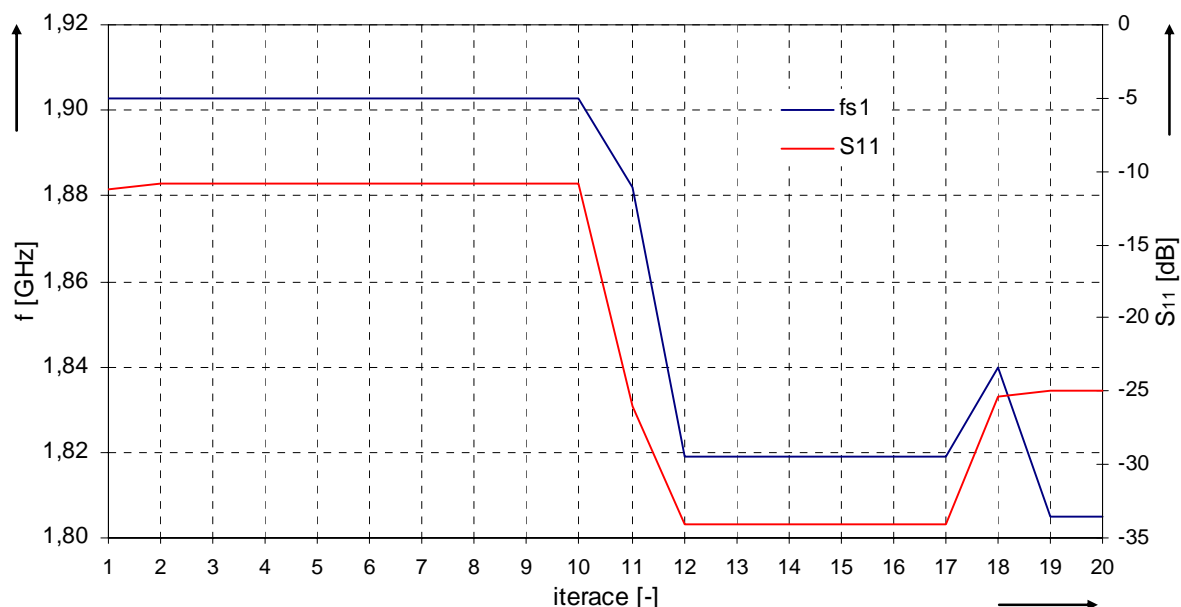
- $S_{11} = -24,92337$  dB pro  $f_1 = 1,805$  GHz
- $S_{11} = -11,32167$  dB pro  $f_2 = 5,284$  GHz



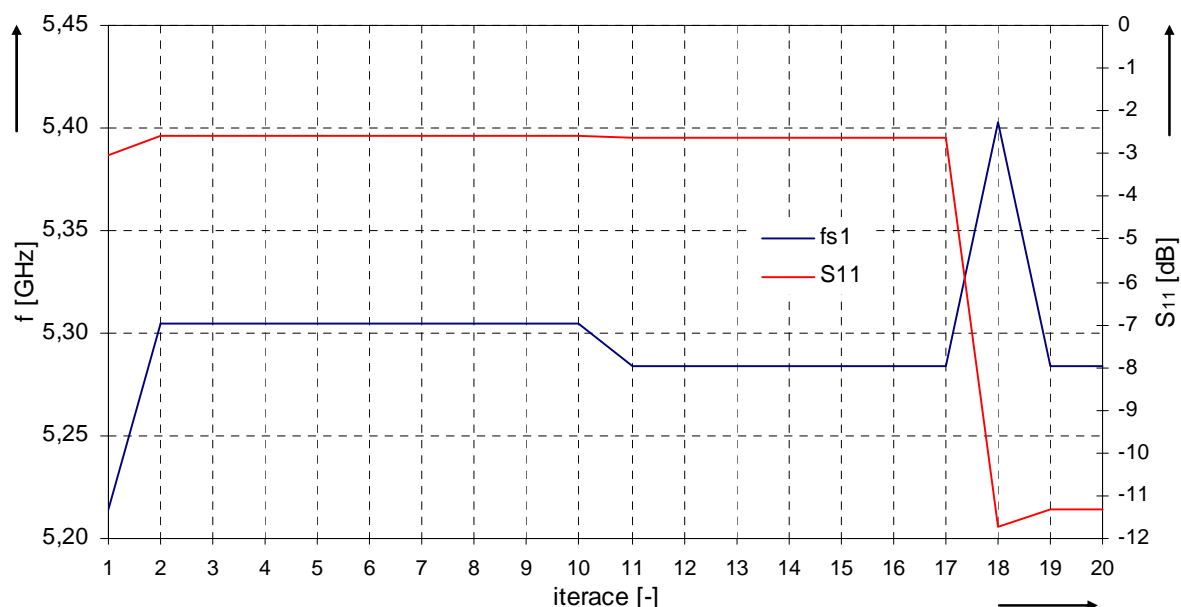
**Obr. 5-3** Průběh činitele odrazu na vstupu antény pro anténu se dvěma U zářezy po optimalizaci kolonií mravenců

Na následující sérii grafů jsou ukázány změny frekvencí a hodnot  $S_{11}$  v decibelech. Z ohledem na určitou přehlednost průběhů je omezen počet zobrazených iterací na takovou hodnotu, po jejímž dosažení již nedochází ke změnám nejlepšího nalezeného řešení, neboli

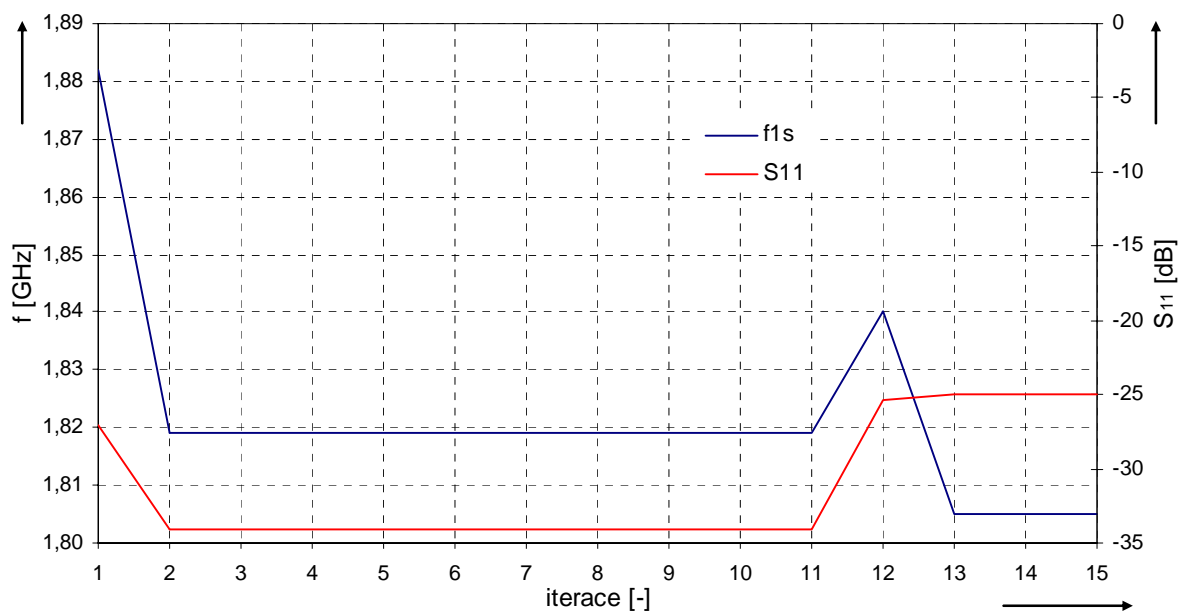
všechny další body, které mravenec prohledal mají horší kriteriální funkci. Také nejsou přítomny výsledky všech mravenců, ale pouze těch, u kterých dochází k nejvýraznějším změnám (konkrétně 1., 4., 6. a 8.). Grafy jsou řazeny tak, že nejprve je umístěn průběh na nižší optimalizované frekvenci ( $f_p = 1,8 \text{ GHz}$ ) a poté na vyšší ( $f_p = 5,3 \text{ GHz}$ ) vždy pro jednoho mravence, aby byla patrná souvislost mezi průběhy.



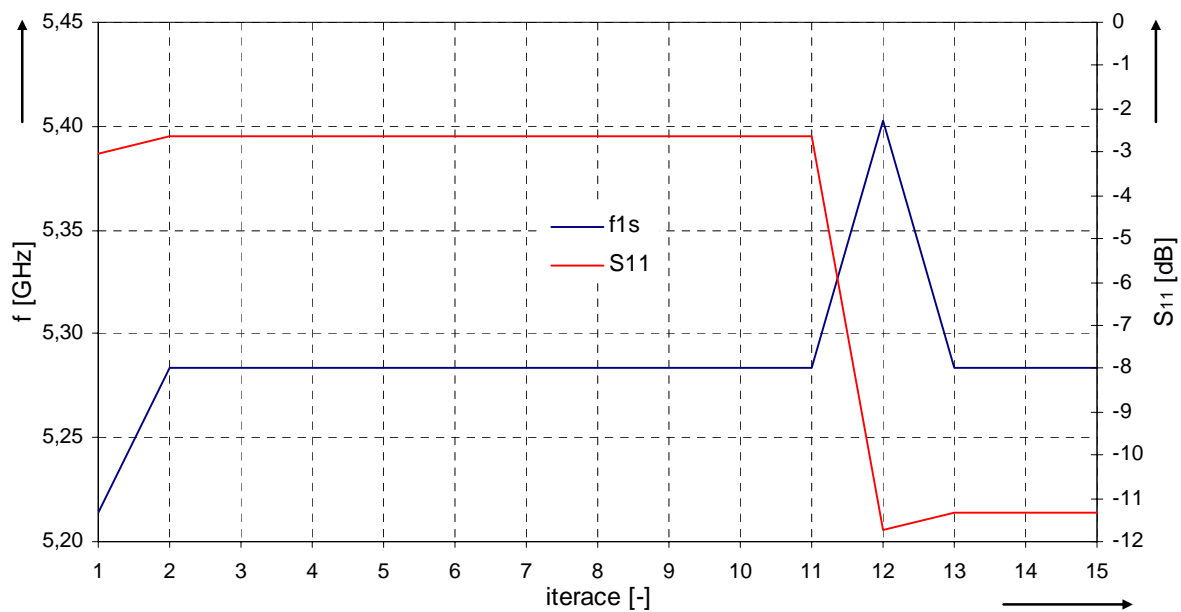
**Obr. 5-4** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 1. mravence -  $f_p = 1,8 \text{ GHz}$



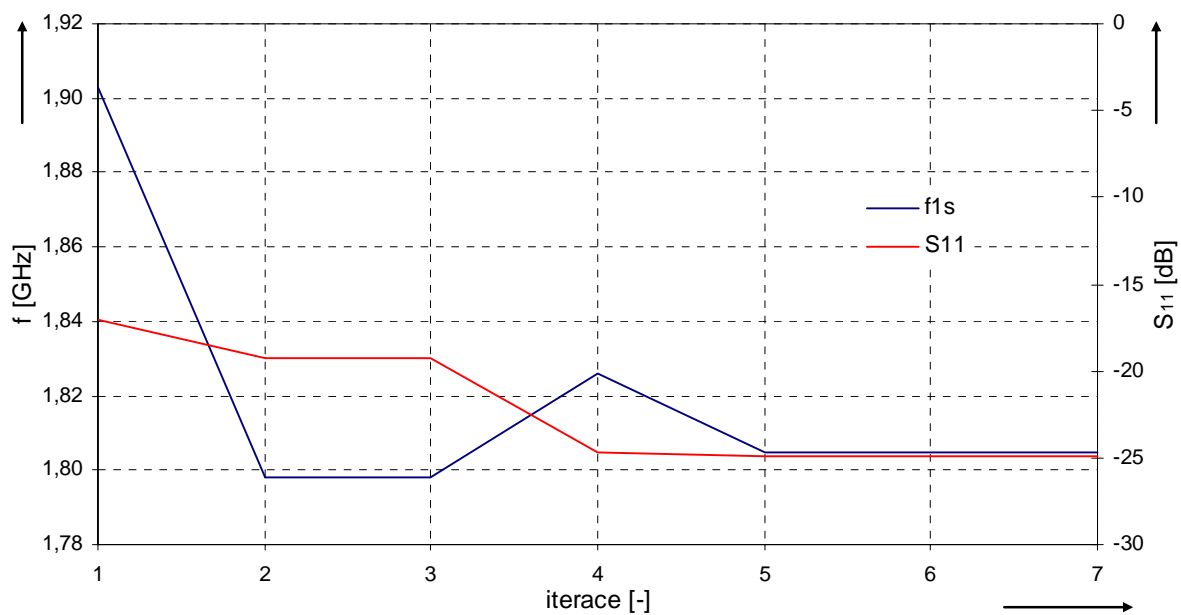
**Obr. 5-5** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 1. mravence -  $f_p = 5,3 \text{ GHz}$



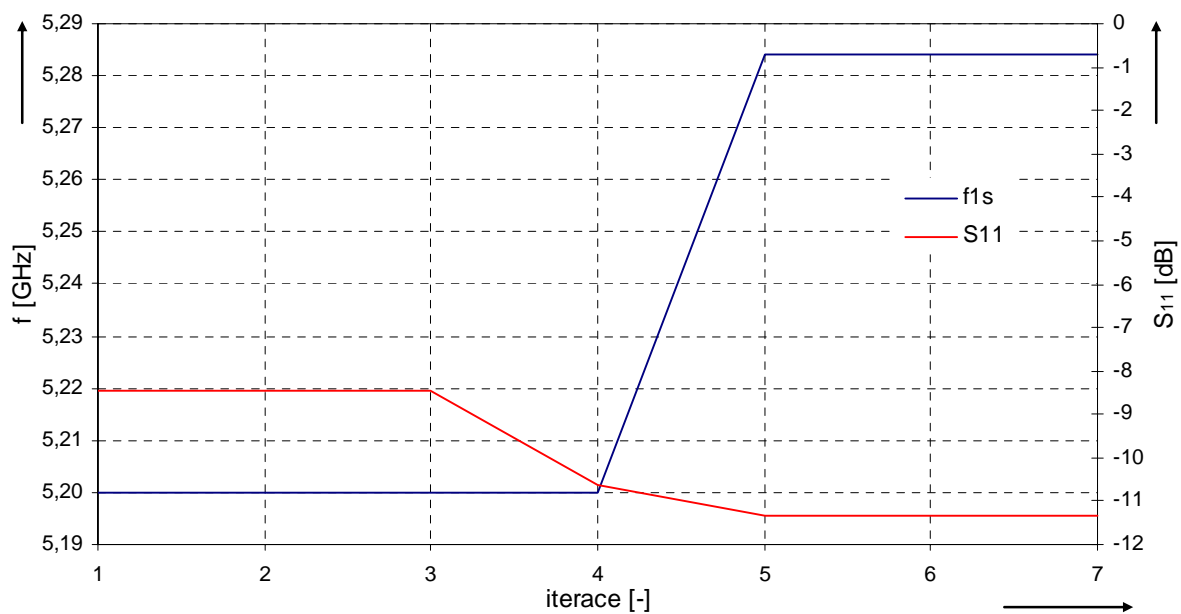
**Obr. 5-6** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 4. mravence -  $f_p = 1,8$  GHz



**Obr. 5-7** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 4. mravence -  $f_p = 5,3$  GHz

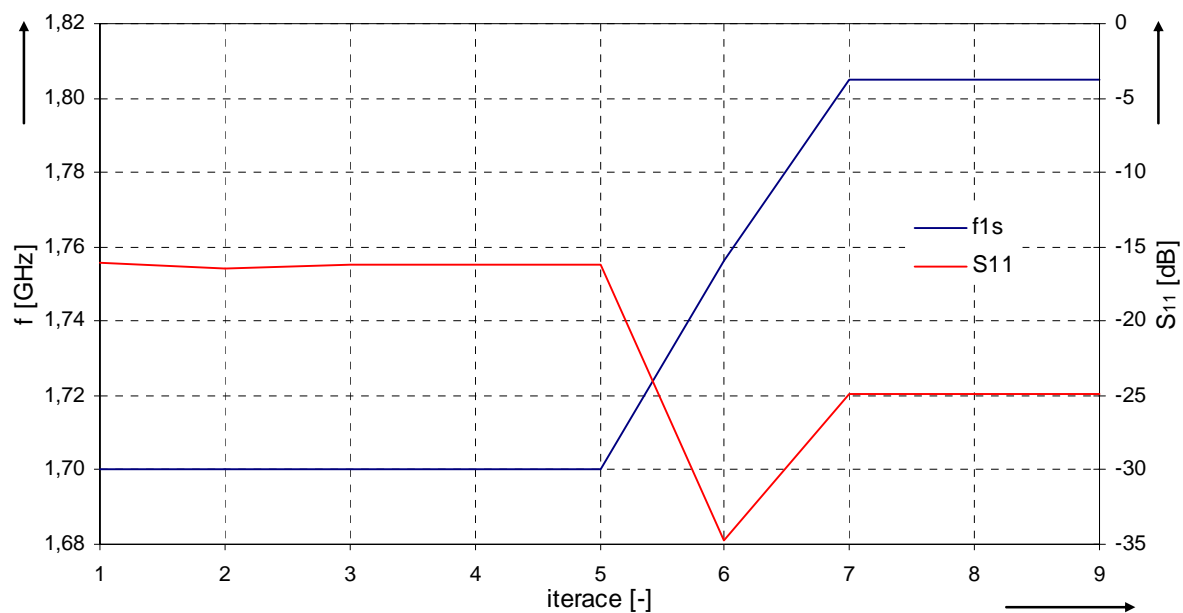


**Obr. 5-8** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 6. mravence -  $f_p = 1,8$  GHz

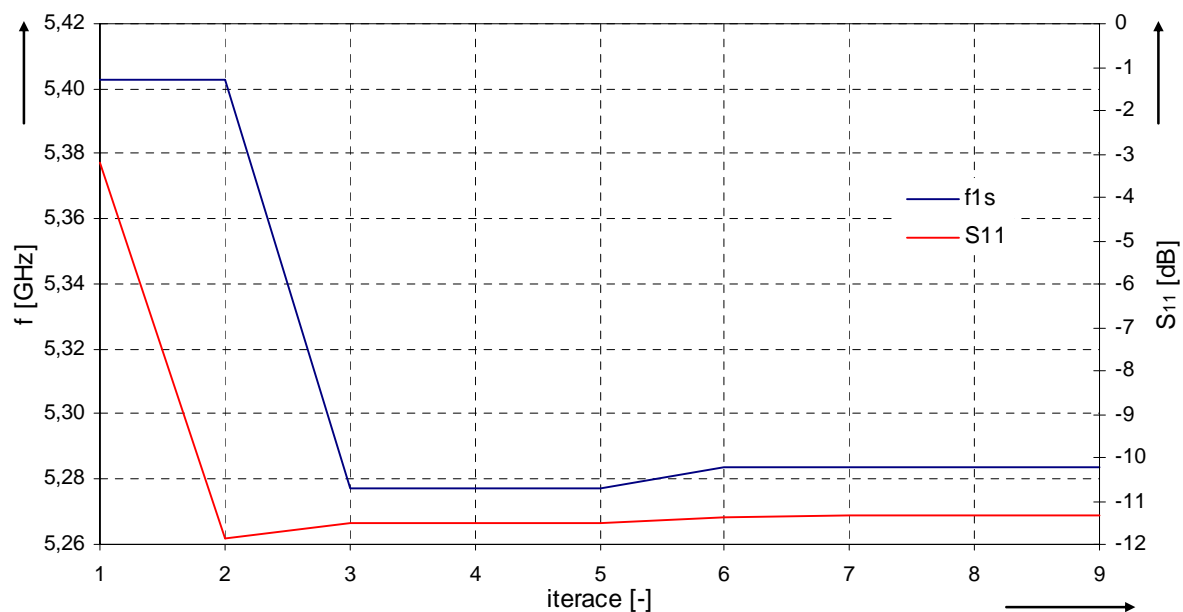


**Obr. 5-9** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 6. mravence -  $f_p = 5,3$  GHz





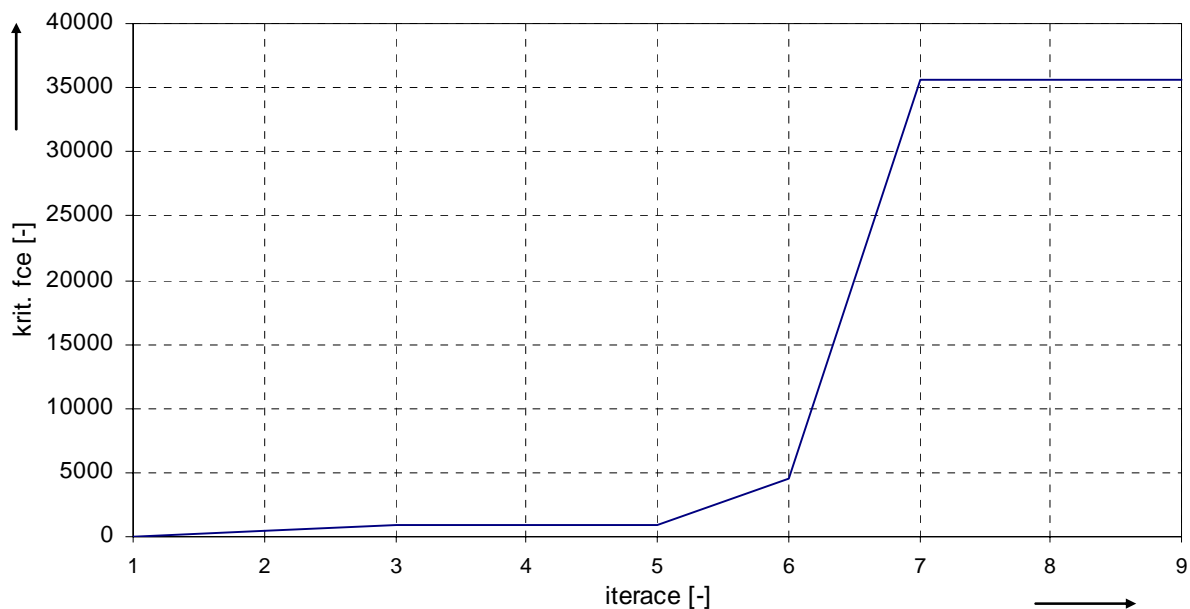
**Obr. 5-10** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 8. mravence -  $f_p = 1,8$  GHz



**Obr. 5-11** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 8. mravence -  $f_p = 5,3$  GHz

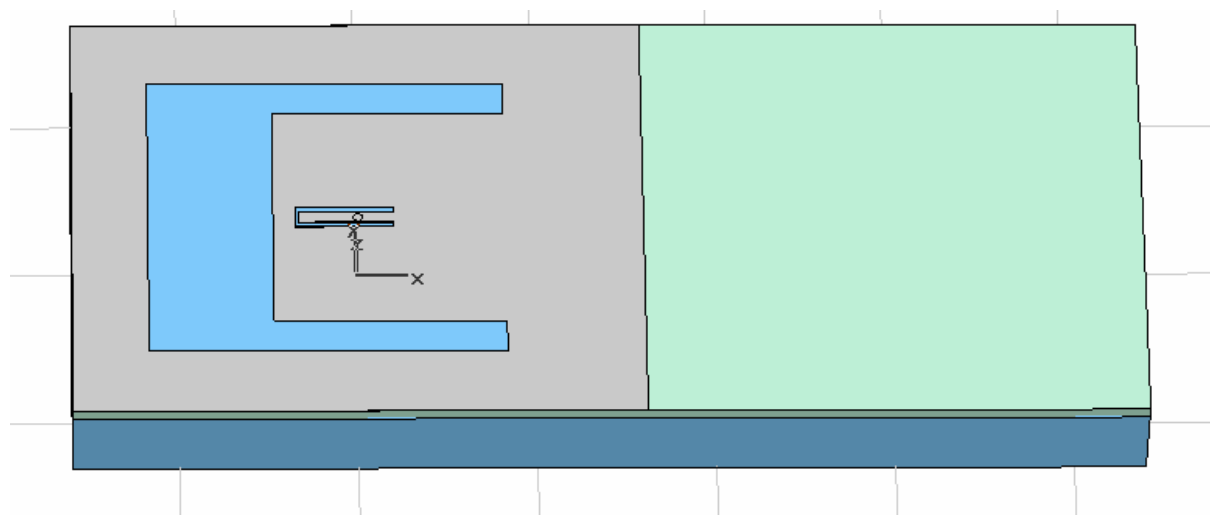
Je vidět, že nejrychleji našel řešení 6. mravenec, a to v 5. iteraci. Pro představu, jakých hodnot dosahuje kritériální funkce a jakým způsobem dochází ke změnám jejích hodnot, je na *obr. 5-12* uveden její průběh pro osmého mravence. Tento průběh má ovšem menší vypovídací hodnotu, vzhledem k tomu, že ideální hodnota, ke které se snažíme dostat je

teoreticky nekonečno či určitá hodně vysoká hodnota při použití nějaké omezující podmínky (viz vztah 5.1 – výpočet kritériální funkce) a ne jako např. u frekvence jasně daná hodnota. Z průběhu je vidět, že pro výsledné hodnoty frekvence a přizpůsobení na nich získáme kritériální funkci o velikosti 35587,2.



**Obr. 5-12** Změny kritériální funkce v jednotlivých iteracích pro 8. mravence

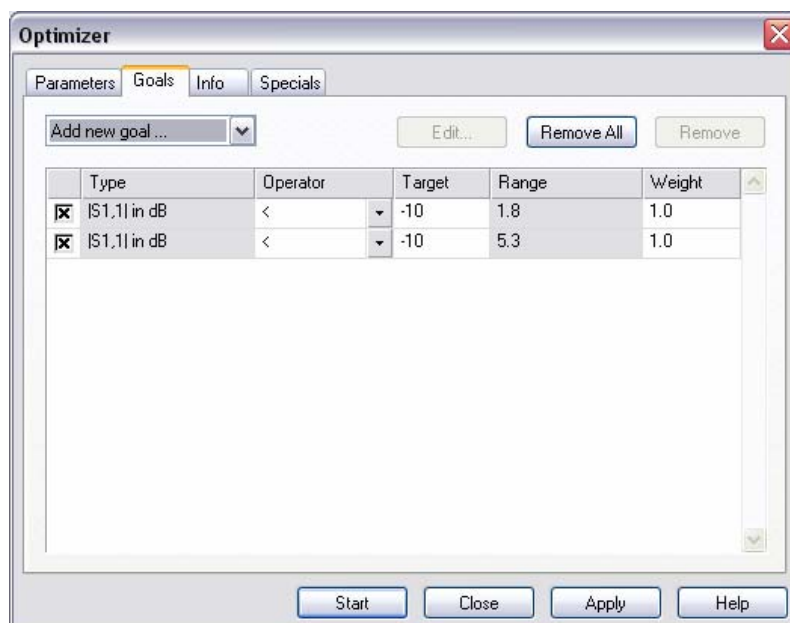
Na následujícím obrázku je zobrazen vzhled antény po provedení optimalizace s výslednými rozměry, tedy délka vnější štěrbiny 40 mm a délka vnitřní 11 mm.



**Obr. 5-13** Náčes antény se dvěma U zářezy po provedení optimalizace

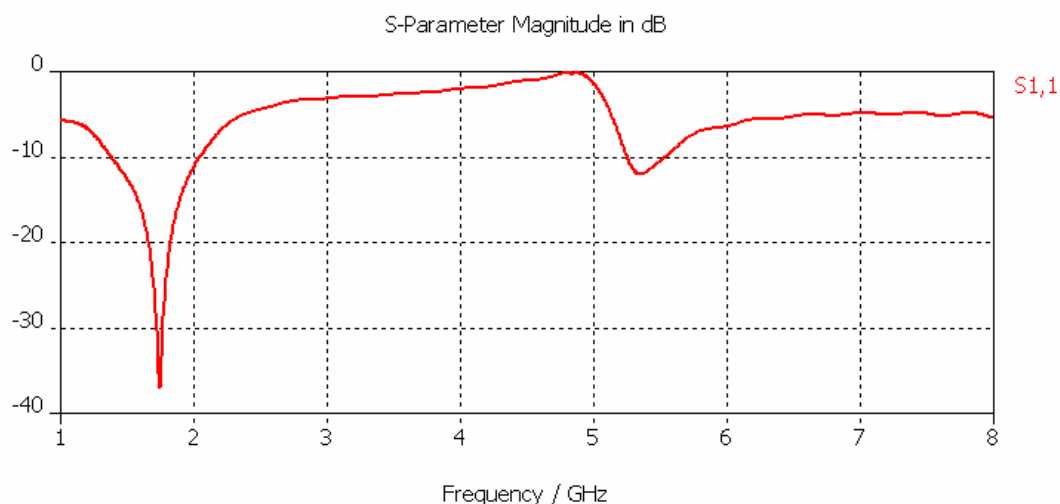
## 5.2.2 Ověření výsledků optimalizace kolonií mravenců

Pro ověření výše popsaných výsledků optimalizace byly použity metody dostupné v *CST Microwave Studio*. Konkrétně byla použita kvazi Newtonova interpolace. Jako vstupní parametry optimalizace byly samozřejmě opět použity délky vnitřní a vnější U-šterbiny, jenž byly rozmítány ve stejných intervalech. Nastavení cílů optimalizace je ukázáno na *obr. 5-14*.



**Obr. 5-14** Nastavení cílů optimalizace v *CST Microwave Studio*

Poté, co byla provedena optimalizace, byl získán průběh činitele odrazu na vstupu antény, jenž je zobrazen na *obr. 5-15*. Tento průběh platí pro délku vnější U-šterbiny 41,11 mm a pro délku vnitřní 10,76 mm.

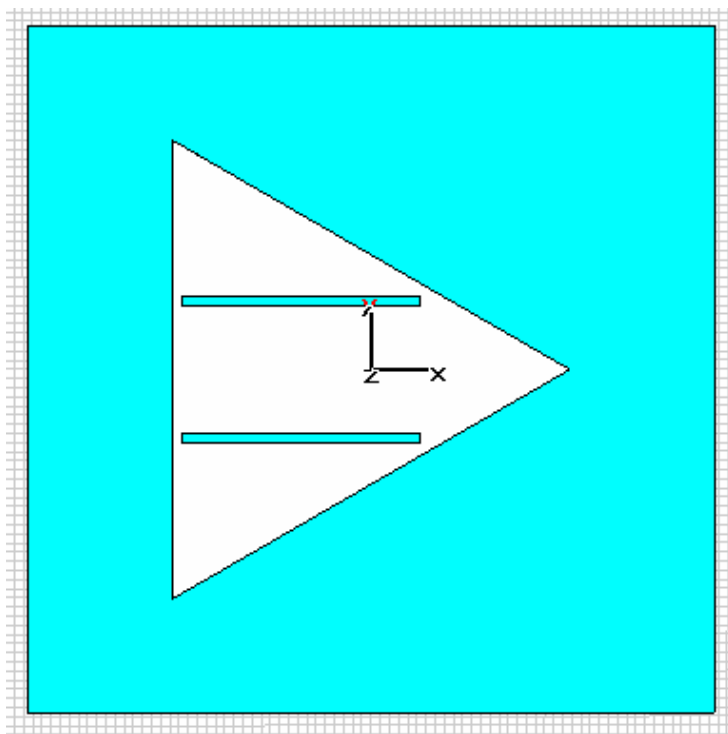


**Obr. 5-15** Průběh  $S_{11}$  po optimalizaci pomocí metod v *CST Microwave Studio*

Konkrétní hodnoty, získané po optimalizaci jsou tyto: na 1,8 GHz je úroveň  $S_{11}$  - 25,41 dB (minimum -32,61 dB se nalézá na frekvenci 1,76 GHz), na 5,3 GHz dosahuje  $S_{11}$  - 10,21 dB (minimum -10,81 dB je na frekvenci 5,355 GHz). I když je určitý rozdíl mezi hodnotami získanými kolonií mravenců a metodami z *CST Microwave Studio*, tak tento rozdíl není nijak zásadní a lze připsat např. velkému kroku mezi rozměry při optimalizaci kolonií mravenců. Nabízí se ovšem otázka, zda je reálné při výrobě dodržet přesnost na setiny milimetru, a tedy dosáhnout přesných hodnot, jaké jsou výstupem optimalizace pomocí metod dostupných v *CST Microwave Studio*.

### 5.3 Trojúhelníková anténa s dvojicí podélných štěrbin

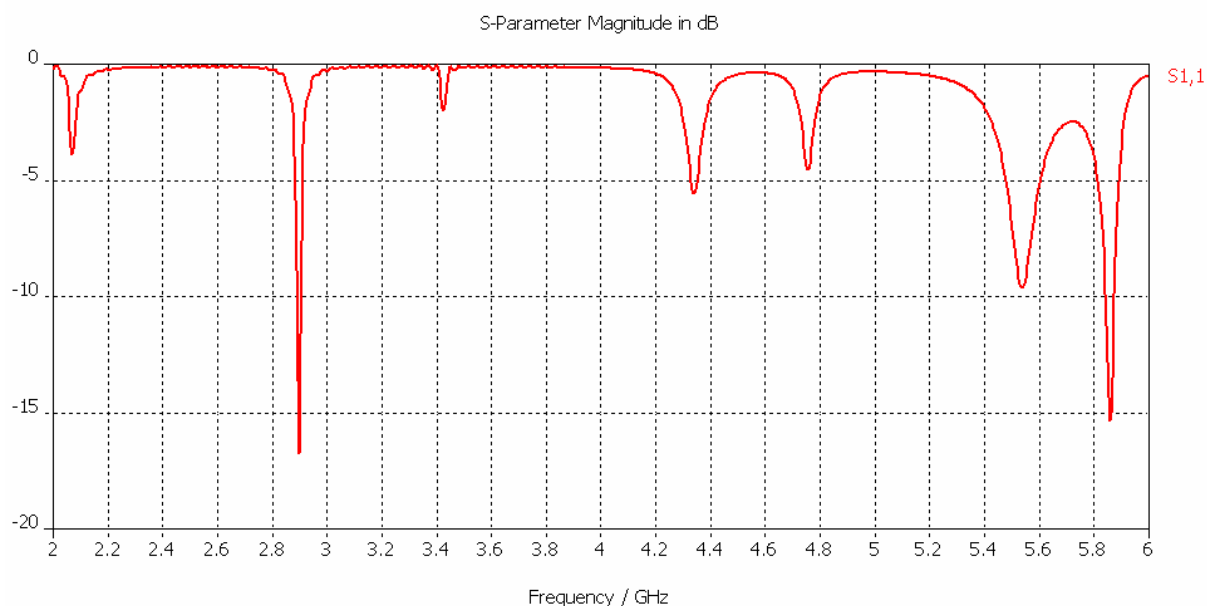
Nákres této antény je zobrazen na obr. 5-16. Jde o náčrtek z prostředí CST Microwave Studio. Na této anténě bude provedena optimalizace kolonií mravenců a poté bude standardní substrát nahrazen substrátem s elektromagnetickými zádržnými pásmy a bude zjištěn jejich vliv na vlastnosti antény. Vlastní anténa se skládá ze čtvercového substrátu o délce strany 75 mm, jenž je umístěn na zemní desce o tloušťce 1 mm. Tloušťka substrátu je 1,6 mm a jako materiál substrátu je použit Arlon AD 600. Tento materiál má relativní permitivitu 6,15.



Obr. 5-16 Náčrtek trojúhelníkové antény

Na substrátu je umístěn anténní flíček, kterým je rovnostranný trojúhelník o hraně 50 mm. Tento flíček je umístěn přesně ve středu substrátu, což znamená, že jeho levá strana je ve vzdálenosti 15,85 mm od hrany substrátu. Uvnitř něj pak jsou umístěny dvě rovnoběžné štěrby, jejichž tloušťka je 1 mm. Oba štěrby jsou od sebe vzdáleny 14 mm a mají délku 26 mm. Odstup obou štěrbin od levé hrany flíčku je 1 mm. Napájení je opět řešeno koaxiální sondou, která je umístěna přesně v ose x (tedy na kolmici z pravého hrotu anténního flíčku a protilehlé strany trojúhelníka) ve vzdálenosti 9 mm od středu substrátu (a tím i celé antény). Od levé strany trojúhelníka je napájecí sonda vzdálena 30,65 mm.

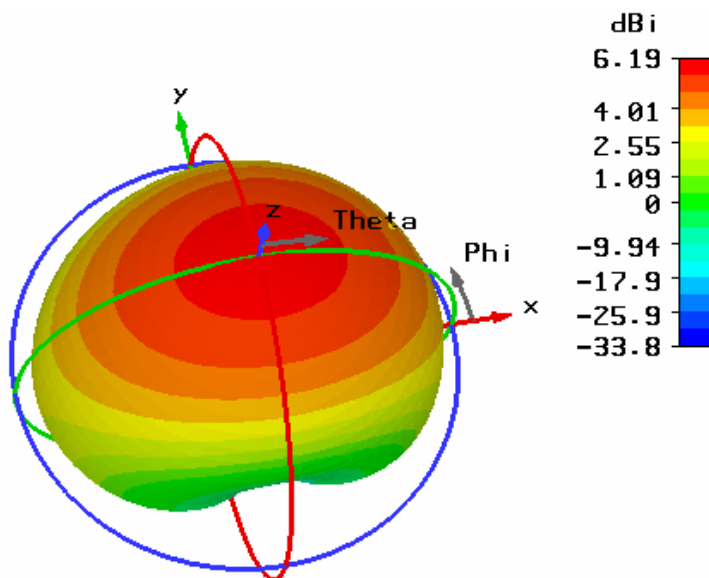
Pokud provedeme analýzu antény s těmito rozměry získáme průběh činitele odrazu na vstupu antény, jenž je zobrazen na *obr. 5-17*. Je z něj patrné, že anténa dosahuje výraznějších minim dosahuje na frekvencích 2,85 GHz (-16,73 dB) a 5,86 GHz (-15,31 dB). Úroveň dosaženého  $S_{11}$  je sice dostatečná, ovšem frekvence, na kterých se tyto minima nalézají, nejsou příliš vhodné. Naším cílem tedy bude optimalizovat anténu na vhodnější kmitočty. Konkrétně se pokusíme přizpůsobit anténu na kmitočty 2,4 GHz a 5 GHz, což jsou spodní okraje bezlicenčního pásma.



**Obr. 5-17** Průběh  $S_{11}$  pro trojúhelníkovou anténu - základní konfigurace

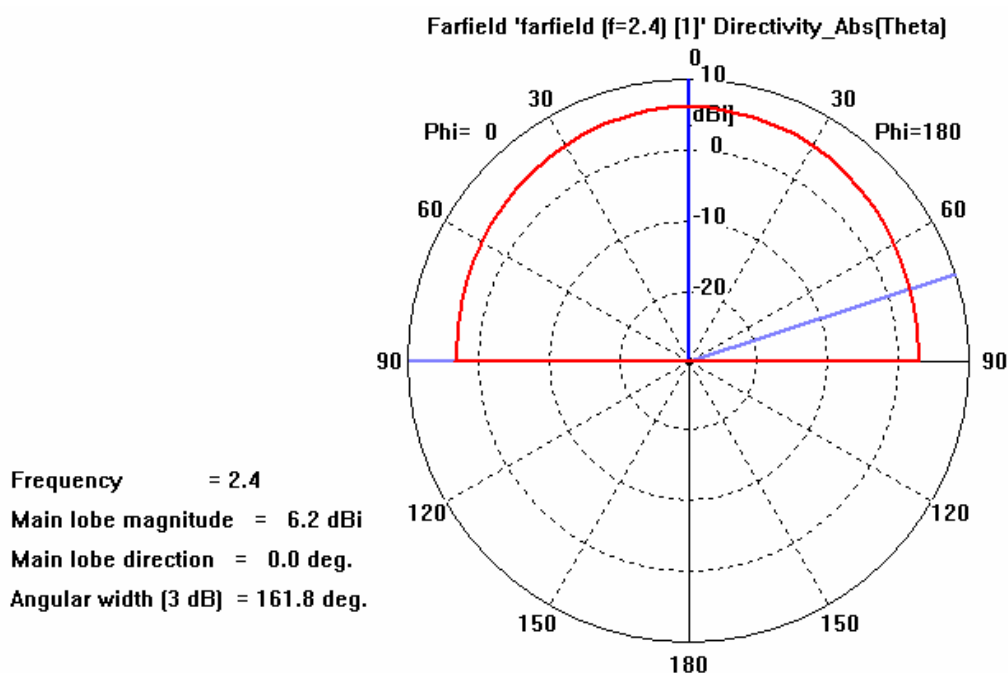
Nejprve si ukažme, jaké vlastnosti má anténa na požadovaných frekvencích. Jednou ze základních vlastností antény, kterou se prezentuje na určité frekvenci, je její směrová charakteristika. Ukažme si tedy jaké směrové charakteristiky má anténa nejprve na frekvenci 2,4 GHz. Začneme 3D modelem směrové charakteristiky, jenž je schopen poskytnout základní představu o směrech, v jakých anténa vyzařuje. Z tohoto modelu je patrné, že anténa má na

frekvenci 2,4 GHz maximální zisk 6,19 dBi a vyzářuje tímto maximem kolmo do osy z. To je ovšem vykoupeno velmi nízkou účinností (0,01869).



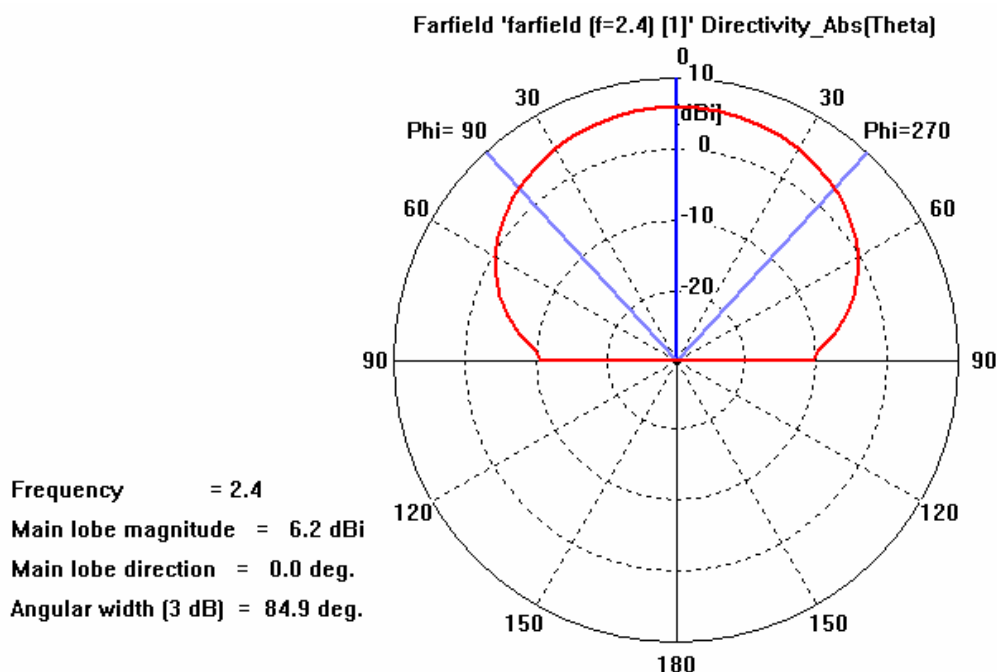
**Obr. 5-18** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény pro  $f = 2,4$  GHz

Nyní si ukažme jednotlivé řezy směrovou charakteristikou. Začneme rovinou xz ( $\Phi = 0^\circ$ ), jenž je zobrazena na obr. 5-19. Z tohoto řezu plyne, že anténa září v této rovině prakticky všesměrově, protože šířka hlavního laloku je  $161,8^\circ$ . Tato oblast je zvýrazněna světle modrými výsečemi, sytě modrá představuje směr maxima zisku).



**Obr. 5-19** Směrová charakteristika trojúhelníkové antény v rovině xz pro  $f = 2,4$  GHz

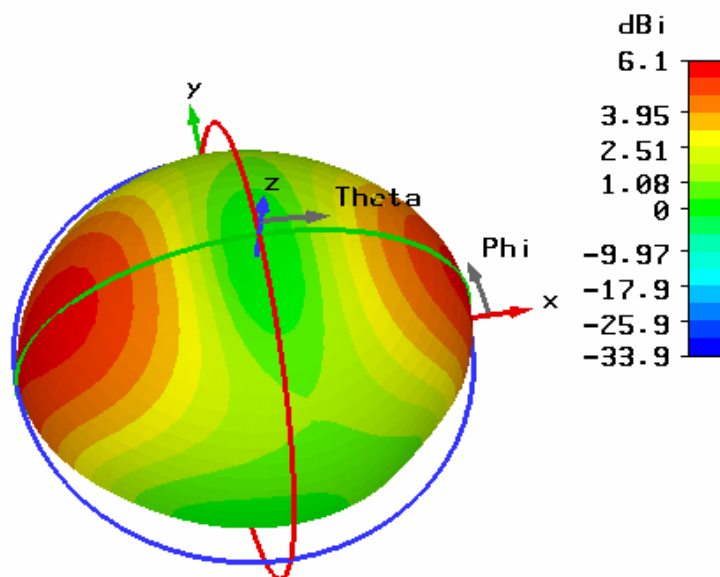
Druhým řezem je řez rovinou yz ( $\Phi = 90^\circ$ ), jenž se nalézá na *obr. 5-20*. V této rovině dosahuje anténa samozřejmě stejné hodnoty zisku, ovšem došlo k poklesu šířky hlavního laloku na  $84,9^\circ$ . Opět je tato oblast zvýrazněna.



**Obr. 5-20** Směrová charakteristika trojúhelníkové antény v rovině yz pro  $f = 2,4$  GHz

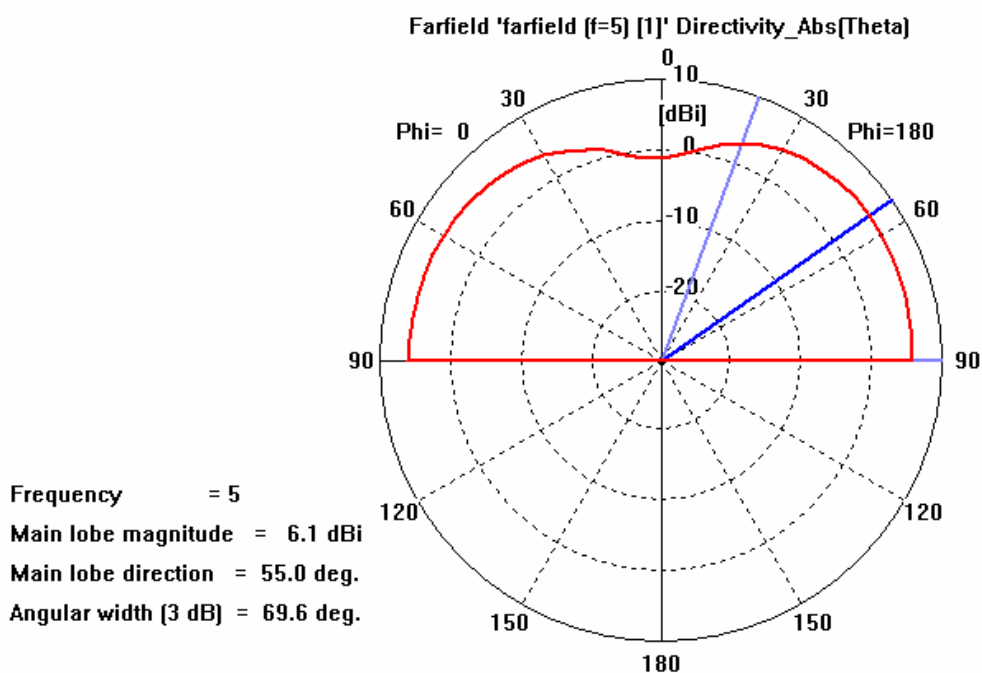
Z výše zobrazených směrových charakteristik je vidět, že anténa má na frekvenci 2,4 GHz dobré vlastnosti (relativně velký zisk, maximum vyzařování ve směru osy z). V rovině xz má anténa spíše všesměrové vlastnosti s tím, že směrem k hraně trojúhelníka ( $\phi = 180^\circ$ ) klesá hodnota zisku rychleji. Naopak v rovině yz je anténa spíše směrová, s tím že maximum zisku je kolmo na střed antény v ose z.

Nyní můžeme přistoupit k analyzování směrových vlastností antény na kmitočtu 5 GHz. Začneme opět 3D zobrazením směrové charakteristiky, které se nalézá na *obr. 5-21*. Hodnota maximálního zisku je podobná jako na frekvenci 2,4 GHz, konkrétně je to 6,097 dBi. Toto maximum nyní ale nesměruje kolmo vzhůru jako v předchozím případě, ale je posunuto a anténa září spíše ve směru osy x (kladné i záporné). Opět je zde ale velmi nízká účinnost (0,06333).



**Obr. 5-21** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény pro  $f = 5 \text{ GHz}$

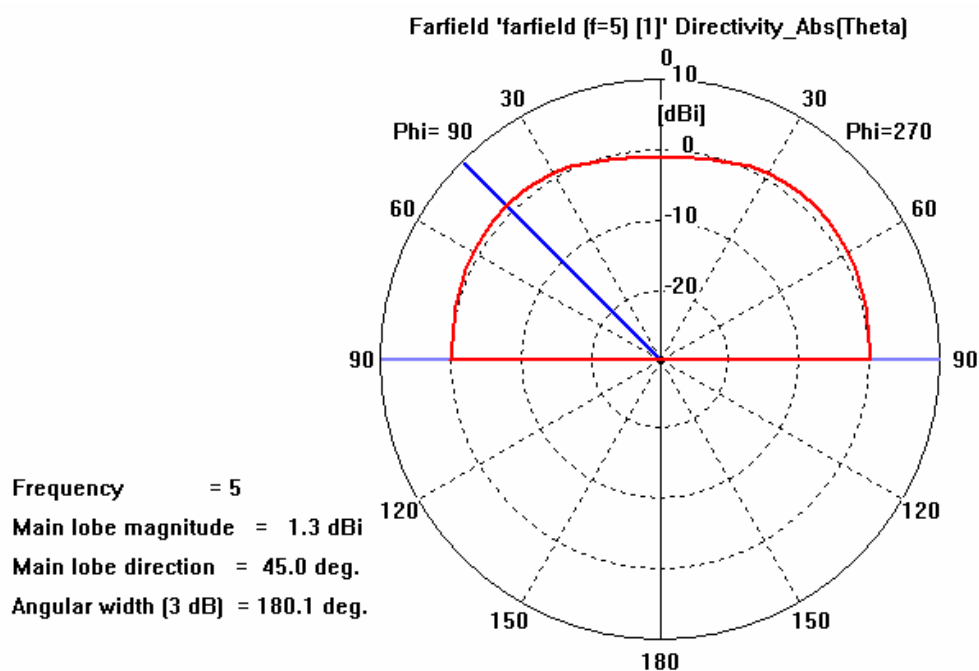
Začneme stejně jako v předchozím případě s rovinou  $xz$  (obr. 5-22). Z této směrové charakteristiky plyne, že maximum zisku je pootočeno o  $55^\circ$  (od osy  $z$  ve směru záporné poloosy  $x$  (šířka laloku  $69,6^\circ$ ), což znamená, že anténa na kmitočtu  $5 \text{ GHz}$  září více ke hraně trojúhelníka než ke špici. V opačném směru (tedy ke špici) je maximum pootočeno o  $85^\circ$  (anténa tedy září spíše v ose  $x$ ) a šířka laloku je zhruba  $64,5^\circ$ .



**Obr. 5-22** Směrová charakteristika trojúhelníkové anteny v rovině  $xz$  pro  $f = 5 \text{ GHz}$



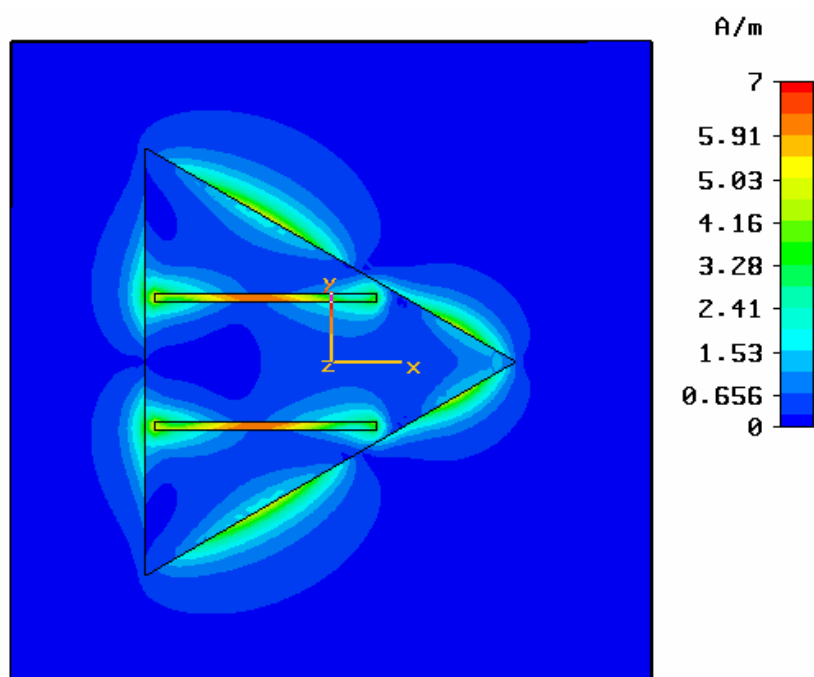
Nakonec je zobrazen řez rovinou yz. V této ose je hodnota maximálního zisku velmi malá (pouze 1,3 dBi) a dá se tedy říci, že anténa v této rovině není použitelná pro vysílání.



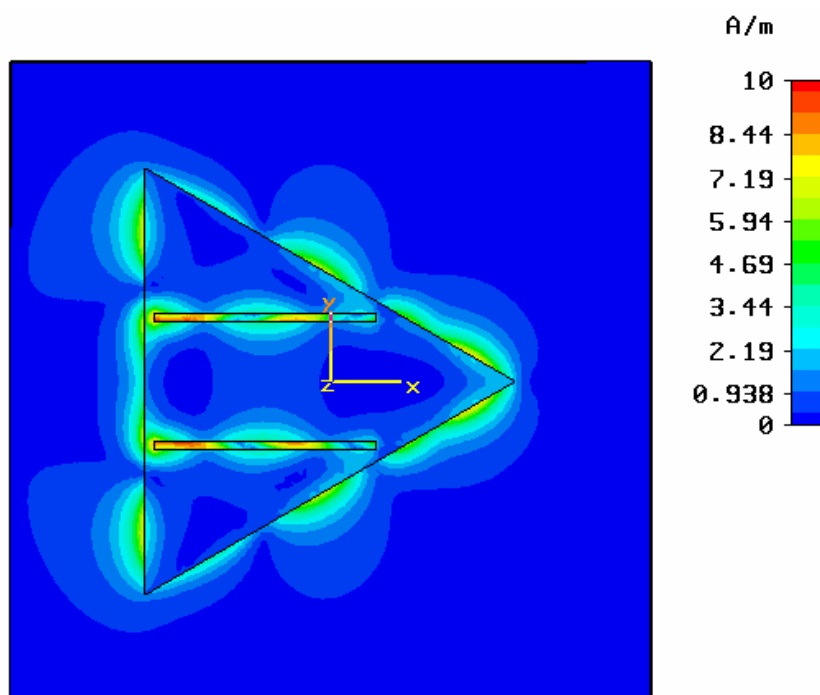
**Obr. 5-23** Směrová charakteristika trojúhelníkové antény v rovině yz pro  $f = 5$  GHz

Ze směrových charakteristik plyne, že anténa má na námi požadovaných kmitočtech sice dobrou úroveň zisku, ovšem je to vykoupeno nízkou účinností, což je vcelku pochopitelné vzhledem k nepřizpůsobení antény na tyto kmitočty.

Nyní máme rozebrány vlastnosti antény a mohli bychom přistoupit k vlastní optimalizaci. Je tu ale otázka, které z rozměrů si vybrat jako vstupní proměnné. K tomuto rozhodnutí je vhodné si zobrazit rozložení intenzity magnetického pole na anténě na požadovaných frekvencích. Jako první je zobrazeno rozložení pole na frekvenci 2,4 GHz (obr. 5-24). Z tohoto obrázku je jasné patrné, že největší vliv na rozložení pole (kromě vlastních hran trojúhelníka) mají poruchové štěrby a to konkrétně koncové části. Na obr. 5-25 je zobrazeno rozložení intenzity magnetického pole na kmitočtu 5 GHz. Toto rozložení je podobné, jako na frekvenci 2,4 GHz, pouze je dosaženo vyšší hodnoty maximální intenzity magnetického pole. Z obou těchto zobrazení je patrné, že nejvhodnější jako vstup optimalizace bude ovlivňování rozměrů a umístění štěrbin. Konkrétně byly vybrány odstup obou štěrbin od stěny trojúhelníka a jejich vzájemná vzdálenost. Při změnách odstup bude zachována pozice druhého konce štěrby (vzhledem k hraně trojúhelníka), což znamená, že se bude zároveň měnit i délka této štěrby.



**Obr. 5-24** Rozložení intezity magnetického pole na kmitočtu 2,4 GHz



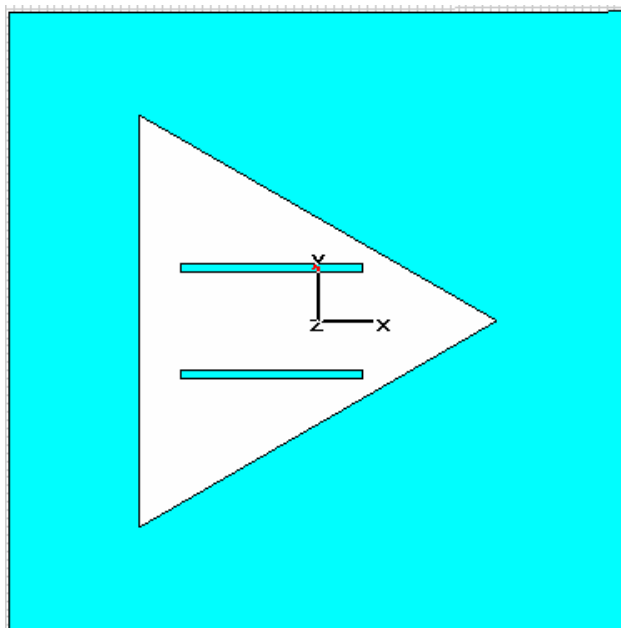
**Obr. 5-25** Rozložení intezity magnetického pole na kmitočtu 5 GHz

### 5.3.1 Optimalizace kolonií mravenců

Jak už bylo zmíněno výše, jako vstupní proměnné optimalizace byly použity odstup štěrbin od stěny trojúhelníka (tím i délka) a jejich vzájemný rozestup. Při optimalizaci byla zachována symetrie antény, tedy parametry obou štěrbin zůstávaly shodné. Vzájemný rozestup se byl měněn mezi 6 a 14 mm s krokem 0,5 mm a odstup štěrbin v intervalu 1 až 17 mm s krokem 1 mm. Naším cílem bylo přizpůsobit anténu na kmitočty 2,4 a 5 GHz. Vzhledem k tomu, že se celkem provádí  $16^2 = 256$  analýz, byl počet iterací na vyhledání nejlepšího řešení zvýšen na 100 (není to přímo nutné, zde použito proto, aby co nejvíce mravenců našlo nejlepší řešení). Tomu odpovídá délka paměti předchozích navštívených uzlů, jejíž délka byla zvýšena oproti předchozímu případu na 20. Opět bylo použito 9 mravenců.

Po provedení optimalizace jsme získali následující rozměry (náskres na *obr. 5-26*):

- odstup štěrbin od hrany 5 mm (délka celé štěrbiny 22 mm)
- rozestup štěrbin od sebe 12 mm

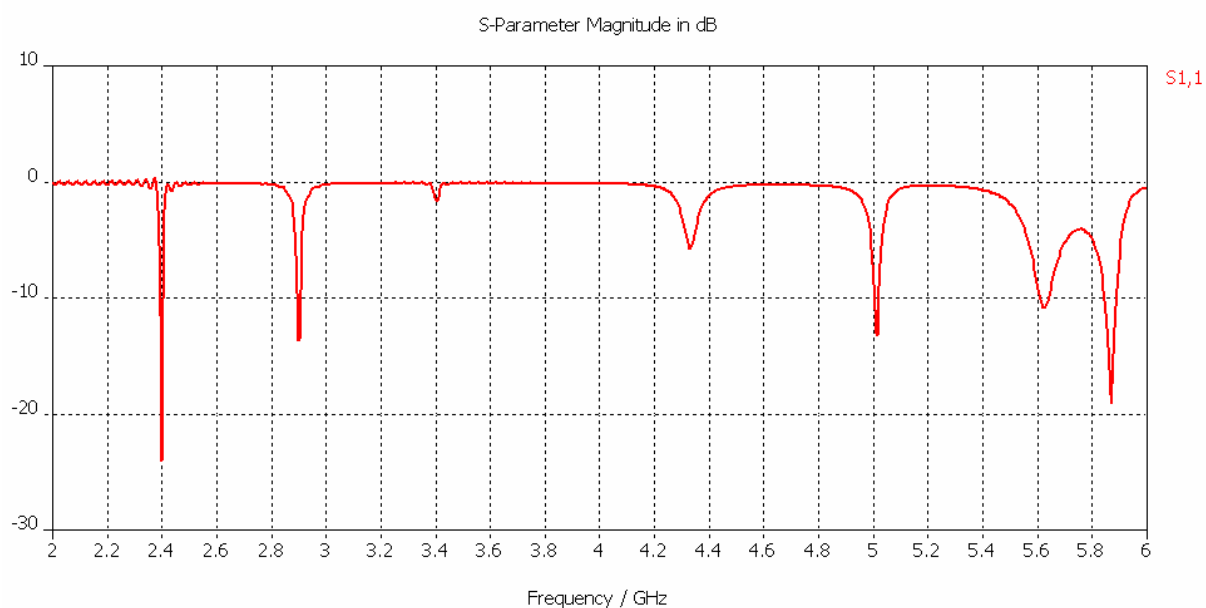


**Obr. 5-26** Náskres trojúhelníkové antény po optimalizaci

Při použití výsledných rozměrů získáme průběh  $S_{11}$  v závislosti na frekvenci, jenž je zobrazen na *obr. 5-27*. Je vidět, že bylo dosaženo požadovaných kmitočtů i s relativně dobrými hodnotami přizpůsobení. Konkrétní jde o následující hodnoty:

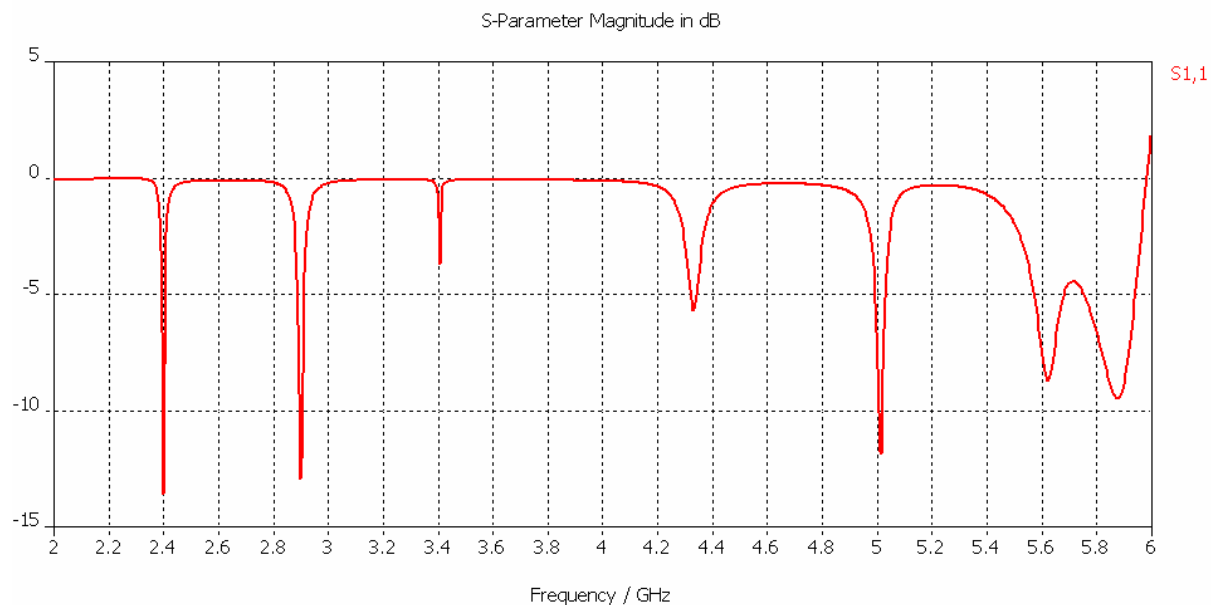
- $S_{11} = -24,01698$  dB pro  $f_1 = 2,4$  GHz
- $S_{11} = -13,22538$  dB pro  $f_2 = 5,016$  GHz

Anténu se tedy podařilo zoptimalizovat na požadované kmitočty. První frekvence je naladěna přesně, u druhé je odchylka 16 MHz. Vzhledem k tomu, že tato odchylka je kladná a minimum přizpůsobení tak spadá do bezlicenčního pásma, je možné ji brát jako nepodstatnou. Opět je hodnota  $S_{11}$  lepší na prvním kmitočtu. Pokud by nás ještě zajímalo pásmo, ve kterém se dá anténa použít (tedy pásmo, kde je  $S_{11}$  nižší než -10 dB), je to od 2,394 GHz do 2,404 GHz (šířka pásma je tedy 10 MHz) pro první kmitočet a 5,05 GHz až 5,022 GHz (neboli 17 MHz) pro druhý kmitočet. Anténa je tedy dost úzkopásmová.



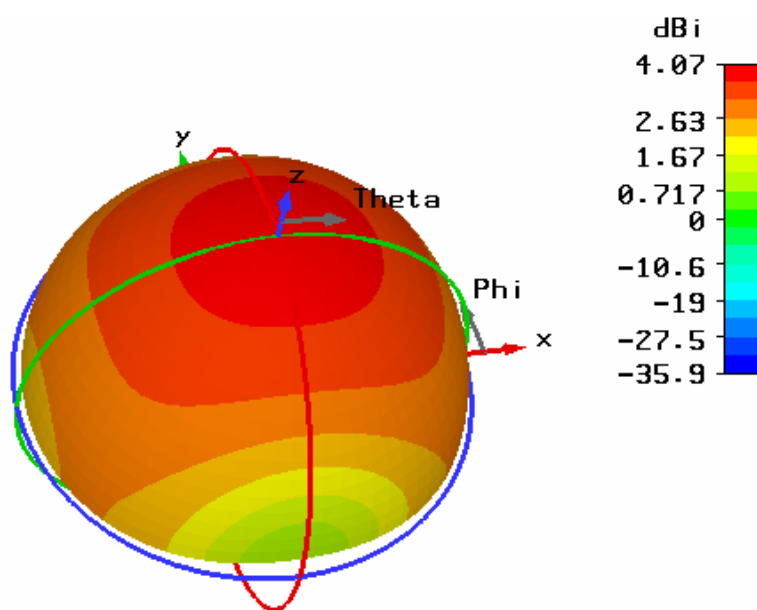
**Obr. 5-27** Průběh  $S_{11}$  pro trojúhelníkovou anténu po optimalizaci kolonií mravenců

Vzhledem k tomu, že se v průběhu činitele odrazu objevují drobné překmity, je ještě vhodné si ukázat jak bude vypadat po použití AR filtru („*Auto-regressive filter*“) z CST. Tento průběh je ukázán na obr. 5-27. Použitím AR filtru obecně získáme hladší průběh (filtr odstraňuje zvlnění v průběhu) a také reálnější, pokud ovšem filtr pracuje správně. Zde způsobí pokles úrovně  $S_{11}$  u 2,4 GHz na -13,58 dB a u 5,016 GHz na -11,84 dB. Vzhledem k tomu, že obě hodnoty přizpůsobení zůstali nad hranicí -10 dB, dá se stále považovat anténa za použitelnou pro vysílání na požadovaných kmitočtech.



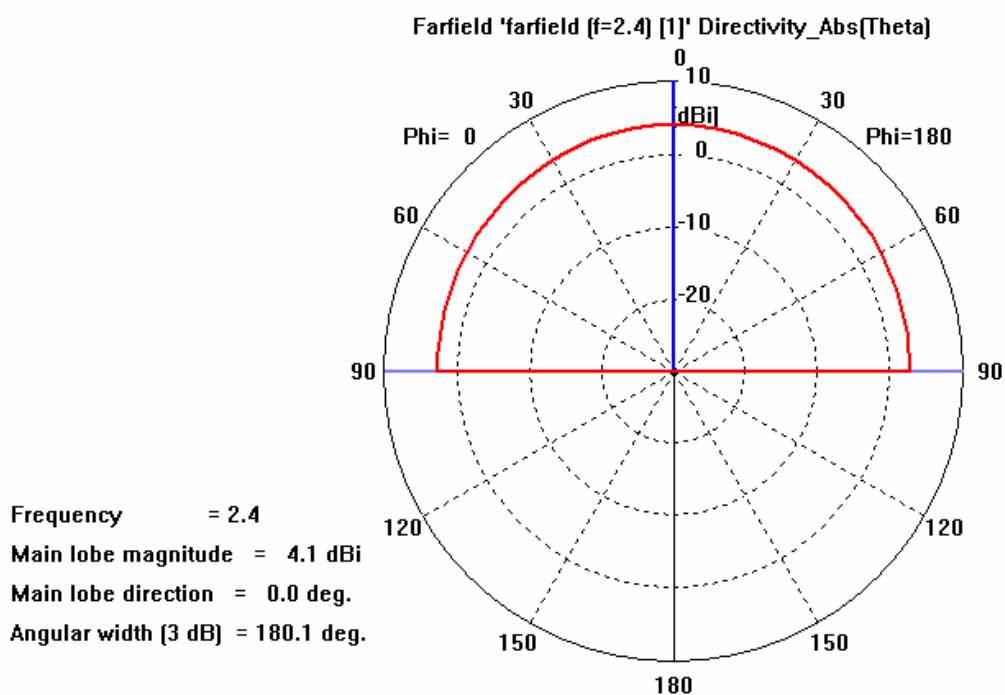
**Obr. 5-28** Průběh  $S_{11}$  pro trojúhelníkovou anténu po optimalizaci kolonií mravenců - použití AR filtru

Nyní si ukážeme, jaký vliv měla optimalizace na směrové charakteristiky. Začneme jako v předchozím případě frekvencí 2,4 GHz. Na obr. 5-29 je zobrazen 3D model směrové charakteristiky, z něž je patrné, že se snížil maximální zisk antény na tomto kmitočtu na hodnotu 4,066 dBi. Anténa ovšem stále vyzařuje maximem do osy z. Pokles zisku byl ovšem kompenzován nárůstem účinnosti antény (0,6268).



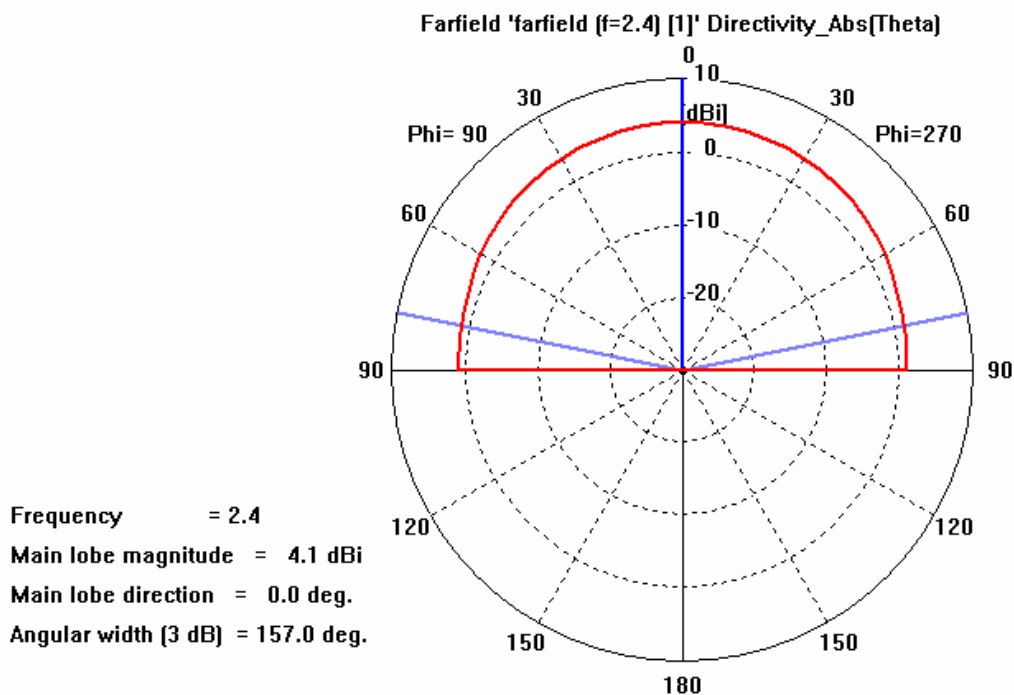
**Obr. 5-29** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény pro  $f = 2,4$  GHz po optimalizaci

Na směrové charakteristice v rovině xz (obr. 5-30) je vidět, že anténa září v této rovině všesměrově (šířka hlavního laloku je  $180^\circ$ ) a maximum je jak už bylo zmíněno výše přímo v ose z.



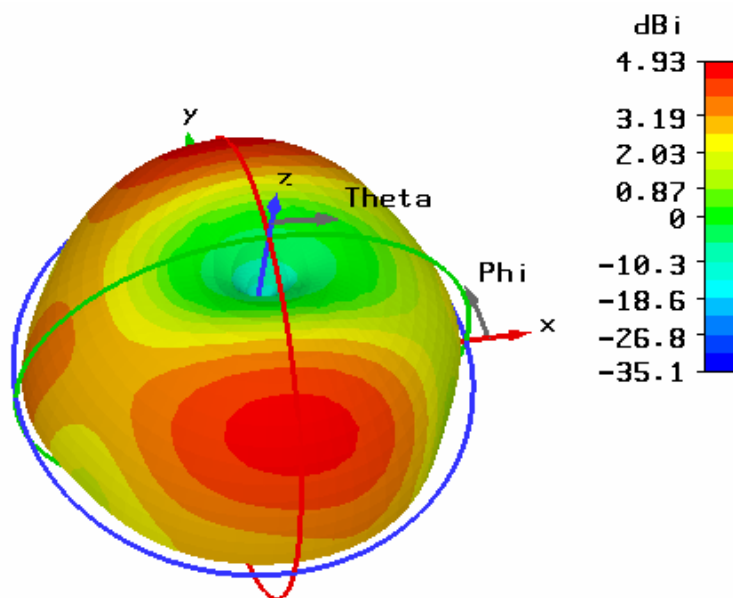
**Obr. 5-30** Směrová charakteristika trojúhelníkové anteny v rovině xz pro  $f = 2,4$  GHz po optimalizaci

V rovině yz má anténa menší šířku hlavního laloku, a to  $157^\circ$ . Maximum záření je opět stejné.



**Obr. 5-31** Směrová charakteristika trojúhelníkové anteny v rovině yz pro  $f = 2,4$  GHz po optimalizaci

Na kmitočtu 5 GHz došlo také ke snížení maximálního zisku na 4,933 dBi, ale hlavně se změnil tvar směrové charakteristiky. Anténa teď září více na opačné strany než v případě neoptimalizované antény. Na další sérii obrázků bude vidět, jak se změnil tvar směrové charakteristiky v jednotlivých rovinách. Také zde se díky přizpůsobení antény na požadovaný kmitočet výrazně zvýšila účinnost antény na hodnotu 0,8043.

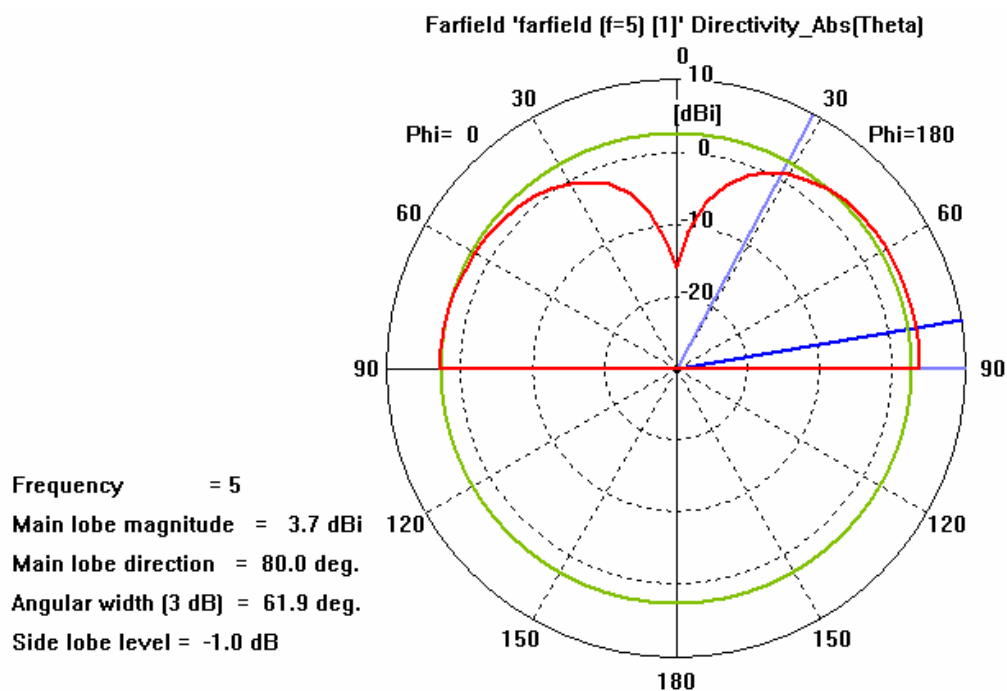


**Obr. 5-32** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény pro  $f = 5$  GHz po optimalizaci

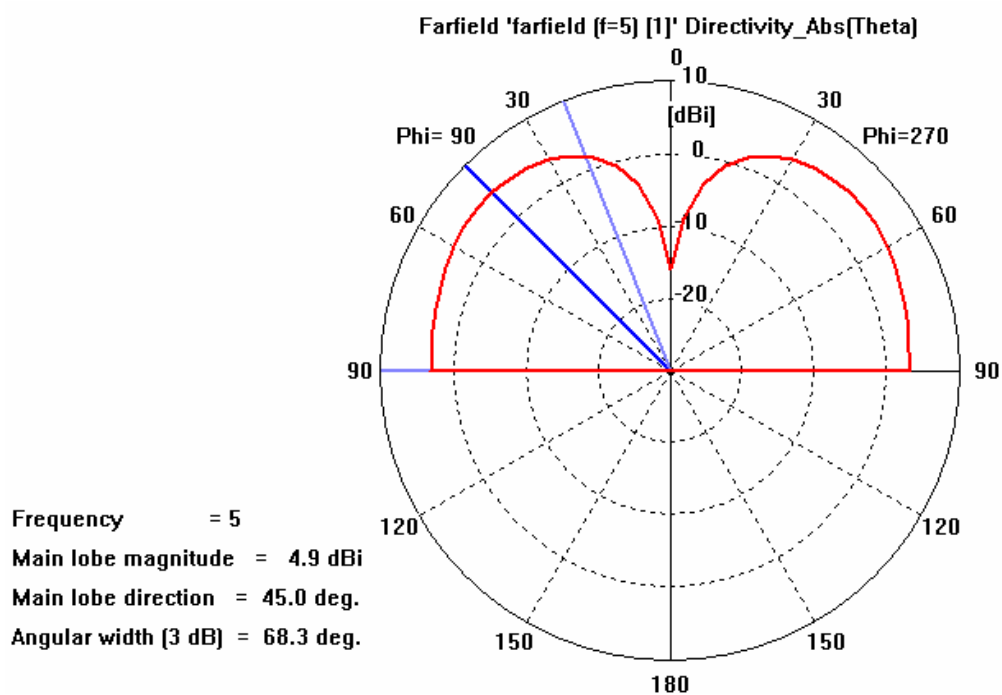
V rovině xz (obr. 5-33) je maximum záření odchýleno od osy z o  $80^\circ$  ve směru záporné poloosy x a dosahuje velikosti 3,669 dBi. Šířka tohoto laloku je  $61,9^\circ$ . Druhý lalok má maximum přesně v ose x (tedy  $90^\circ$  od osy z) a jeho maximum je 2,695 dBi. Lze proto říci, že anténa má v této rovině malý zisk a není proto příliš vhodná pro vysílání v těchto směrech.

V rovině yz má anténa celkové maximum zisku (4,933 dBi), které je shodné v obou lalocích. Ty jsou pootočený o  $45^\circ$  od osy z. Šířka obou laloku v této rovině je  $68,3^\circ$ .

Z hodnot zisku v jednotlivých rovinách a na jednotlivých frekvencích je vidět, že anténa se hodí pro vysílání v obou rovinách pro kmitočet 2,4 GHz, avšak na frekvenci 5 GHz je vhodná spíše jen rovina yz. V této rovině je maximum zisku ve dvou shodných lalocích, jenž jsou vzájemně posunuty o  $90^\circ$ . Na frekvenci 5 GHz je také vyšší zisk o zhruba 1 dB.



**Obr. 5-33** Směrová charakteristika trojúhelníkové anteny v rovině xz pro  $f = 5$  GHz po optimalizaci

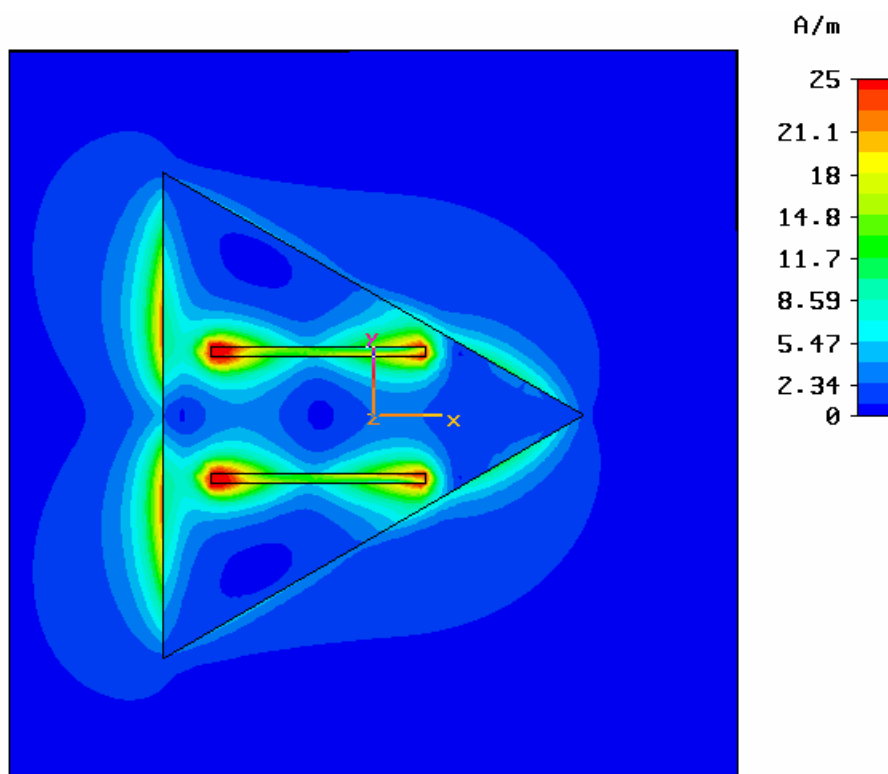


**Obr. 5-34** Směrová charakteristika trojúhelníkové anteny v rovině yz pro  $f = 5$  GHz po optimalizaci

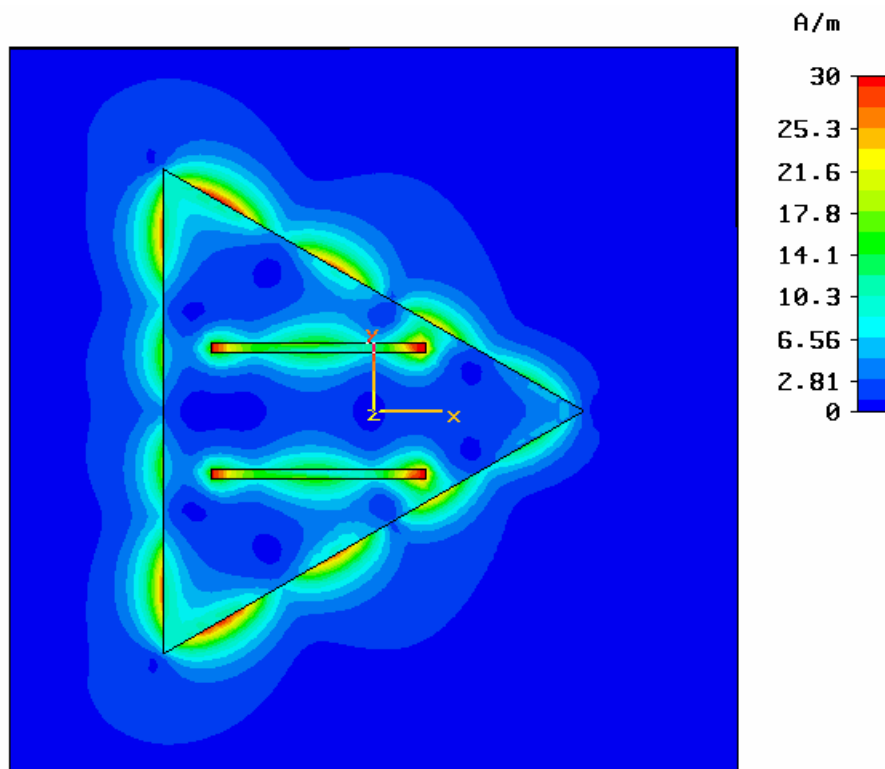
Nakonec si ještě ukažme, jak se změnilo rozložení intenzity magnetického pole na jednotlivých frekvencích. Z obou obrázků (obr. 5-35 a 5-36) je vidět, že výrazně stoupla maximální hodnota intenzity magnetického pole, což je celkem pochopitelné, když byla



anténa na tyto frekvence přizpůsobena) a také se mírně změnilo rozložení intenzity magnetického pole.

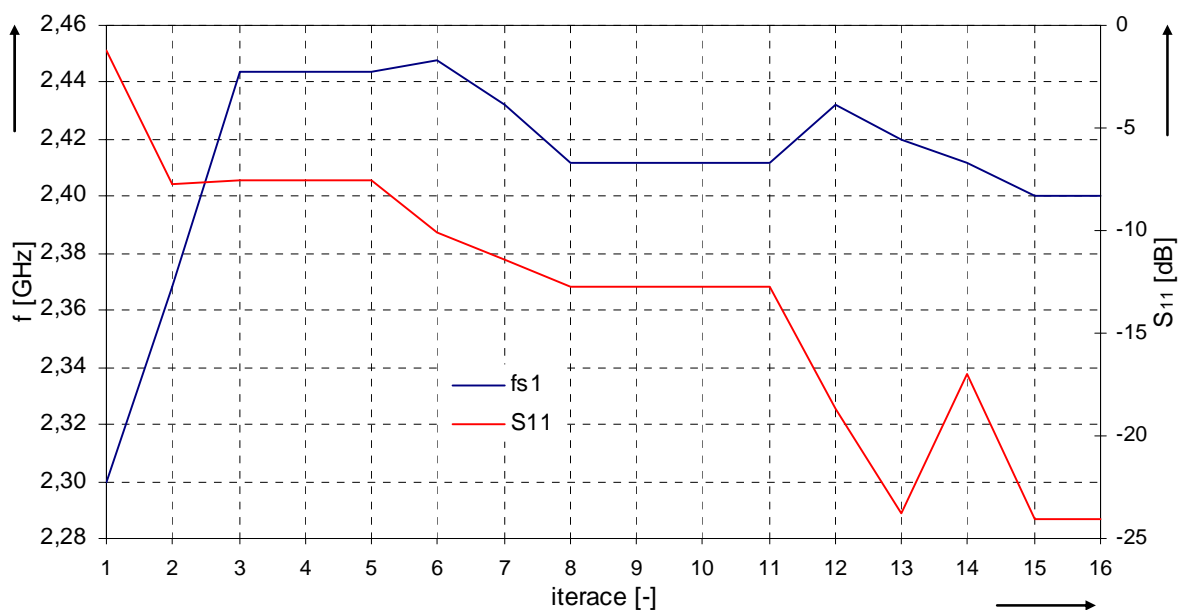


**Obr. 5-35** Rozložení intezity magnetického pole na kmitočtu 2,4 GHz po optimalizaci

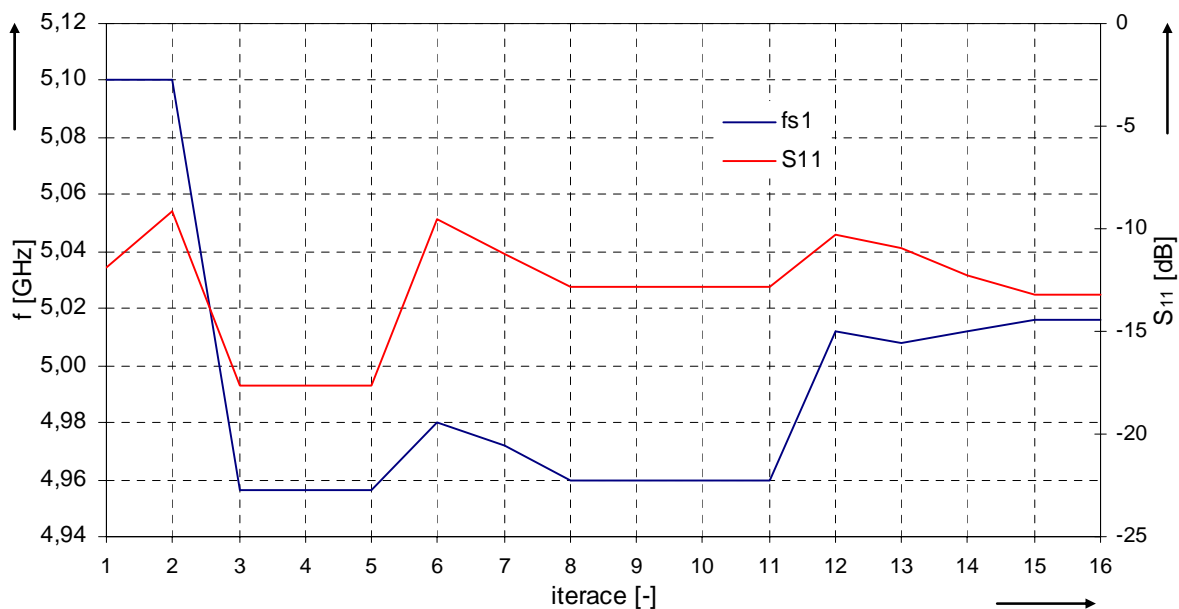


**Obr. 5-36** Rozložení intezity magnetického pole na kmitočtu 5 GHz po optimalizaci

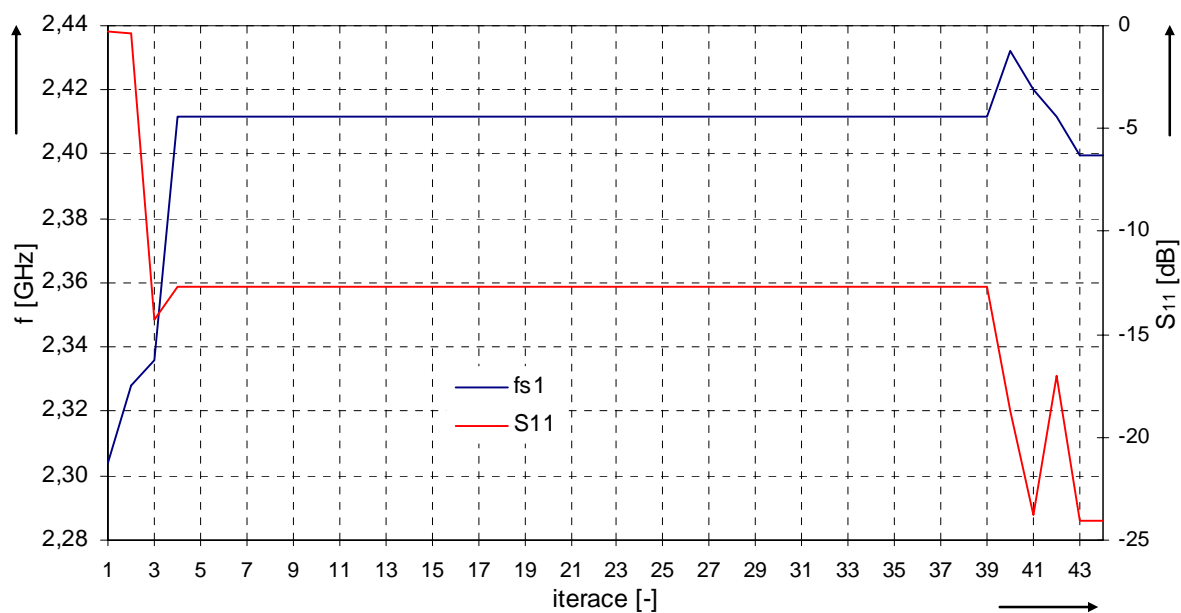
Nyní si ukáže, jakým způsobem se dostali jednotlivý mravenci k správnému řešení. Opět budou zobrazeny průběhy od jednotlivých mravenců zobrazeny pod sebou, aby byla vidět souvislost mezi jednotlivými průběhy.



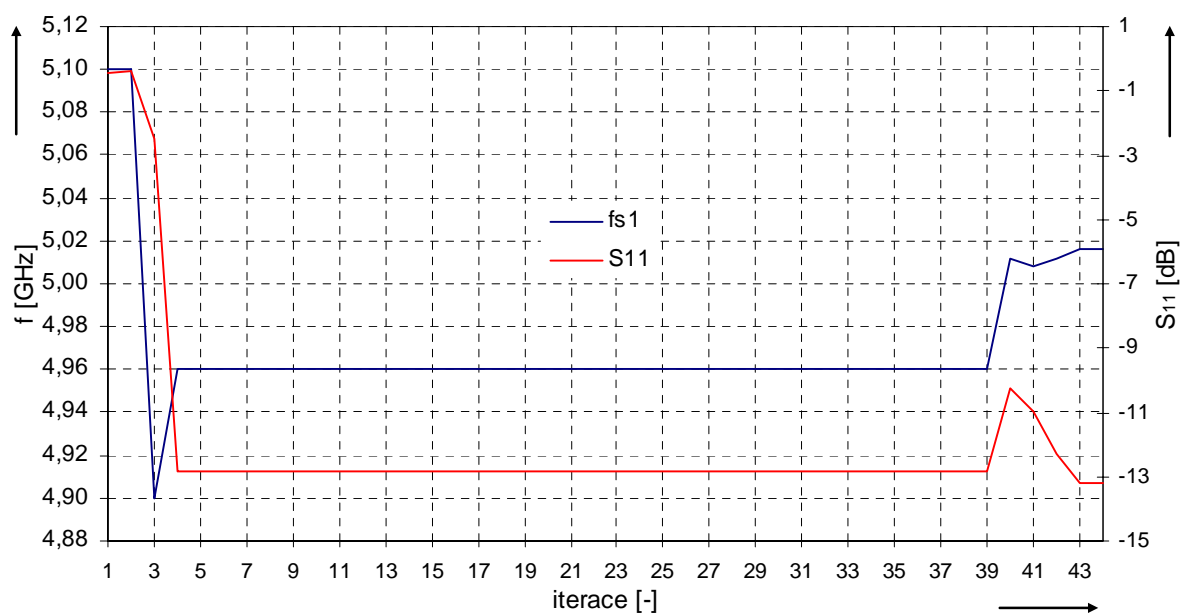
**Obr. 5-37** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 1. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



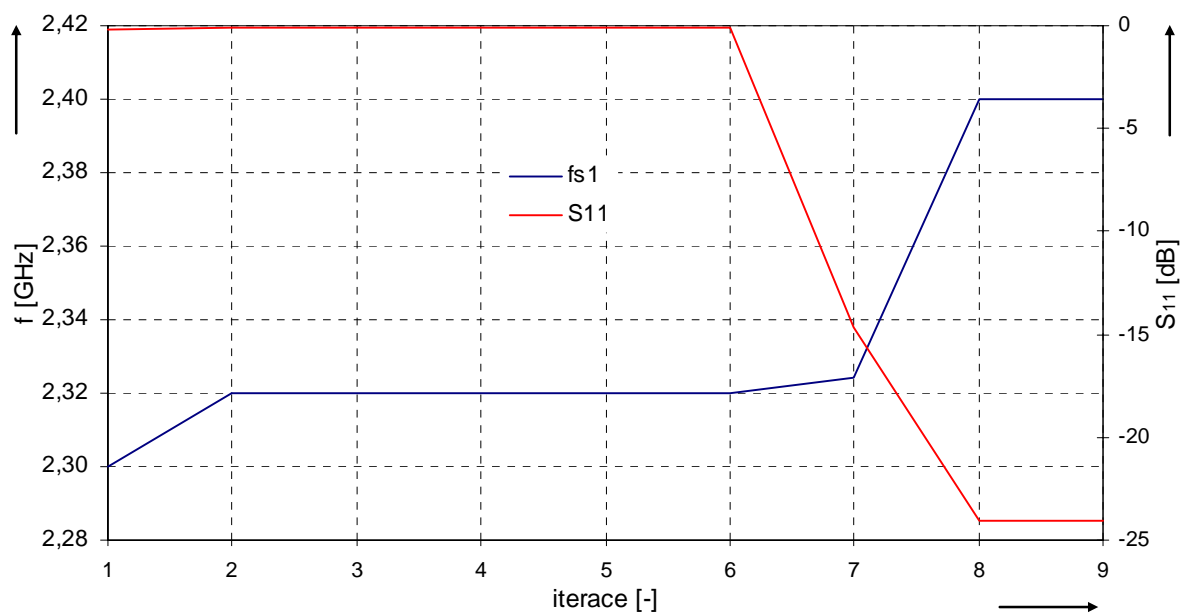
**Obr. 5-38** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 1. mravence -  $f_p = 5$  GHz



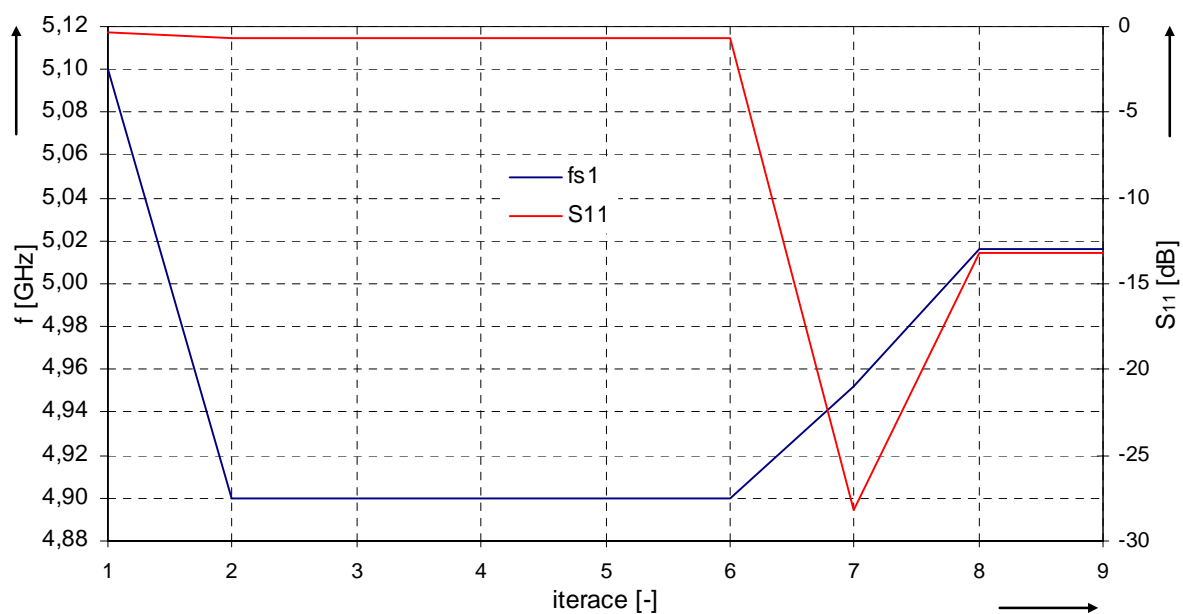
**Obr. 5-39** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 2. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



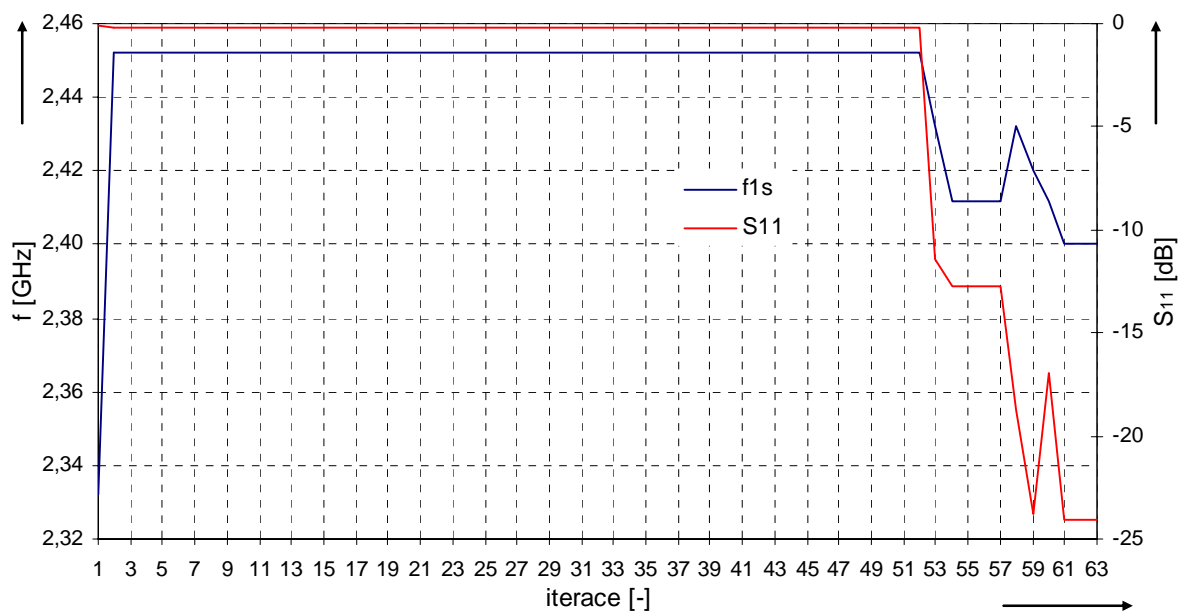
**Obr. 5-40** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 2. mravence -  $f_p = 5$  GHz



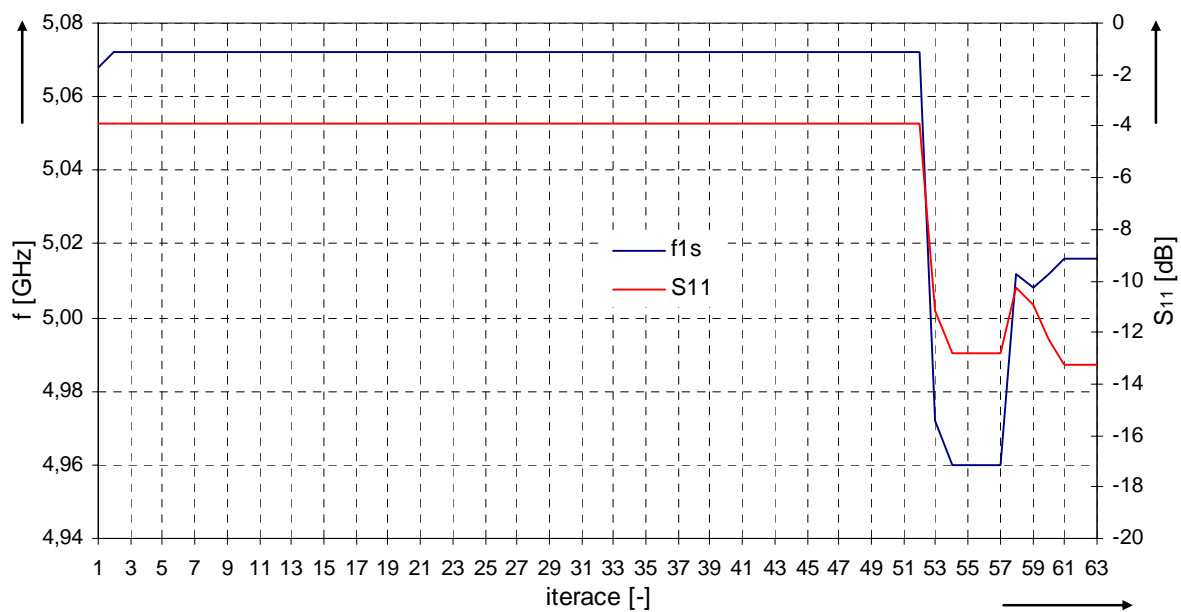
**Obr. 5-41** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 3. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



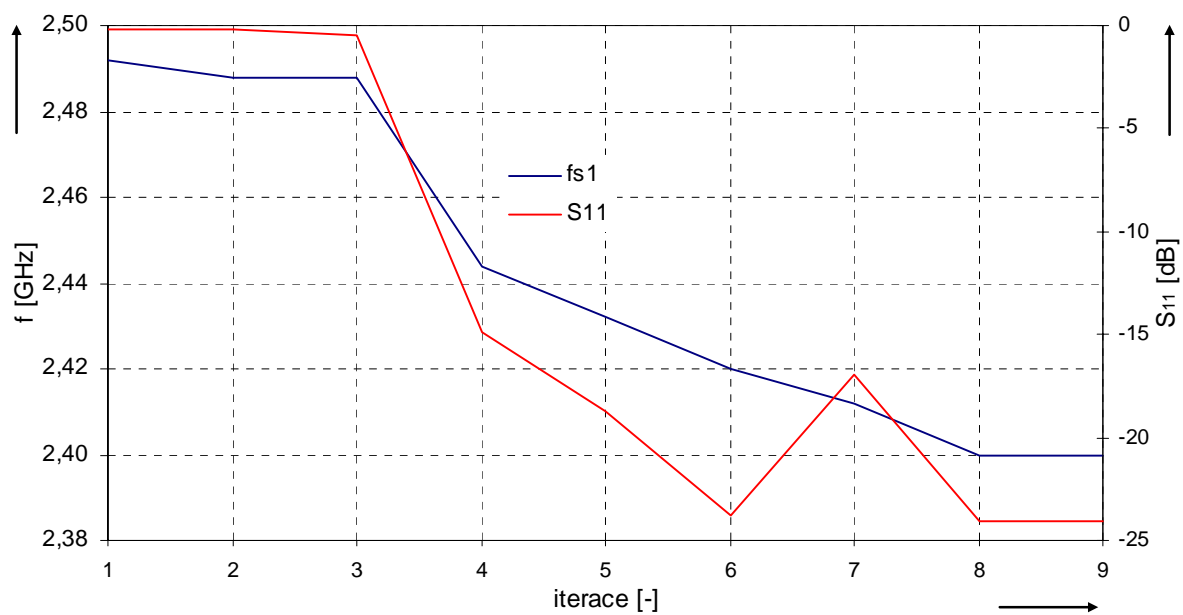
**Obr. 5-42** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 3. mravence -  $f_p = 5$  GHz



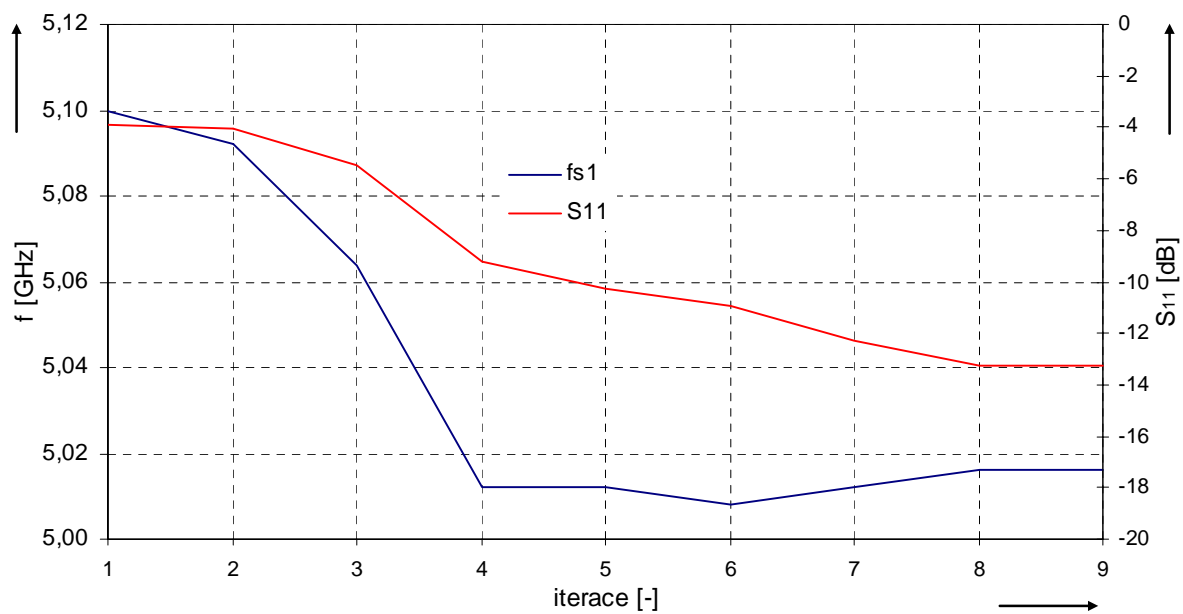
**Obr. 5-43** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 4. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



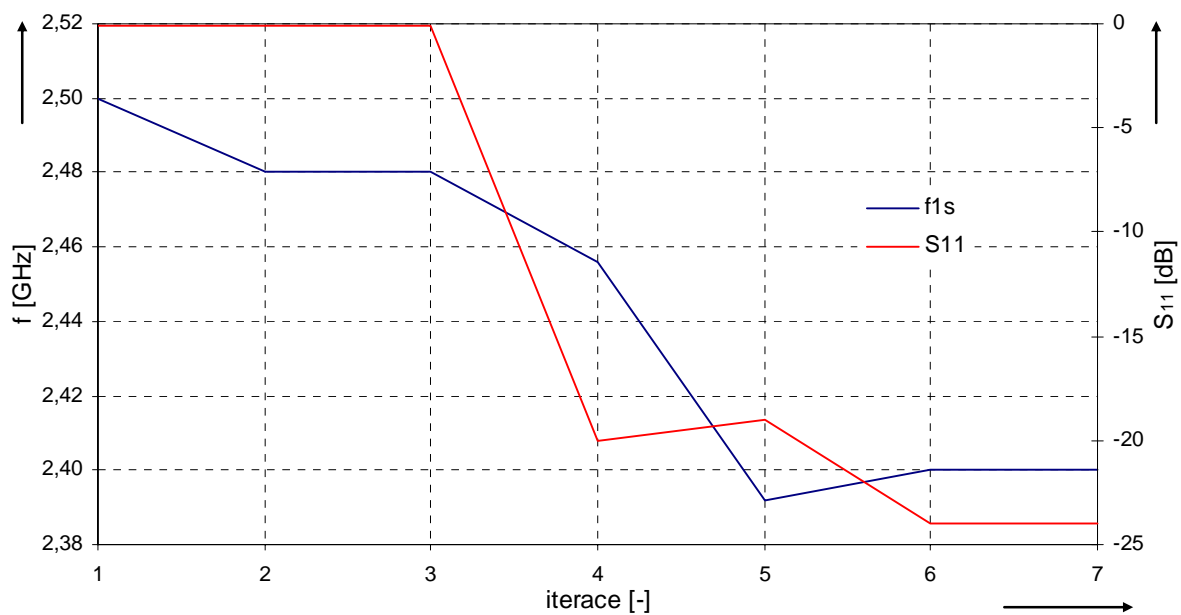
**Obr. 5-44** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 4. mravence -  $f_p = 5$  GHz



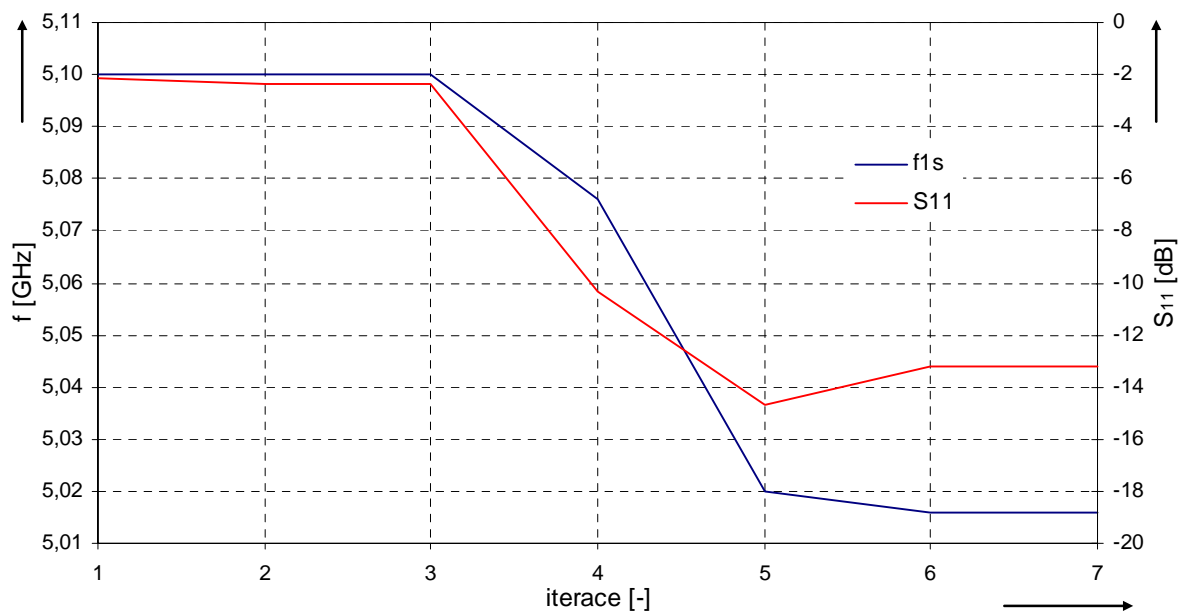
**Obr. 5-45** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 5. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



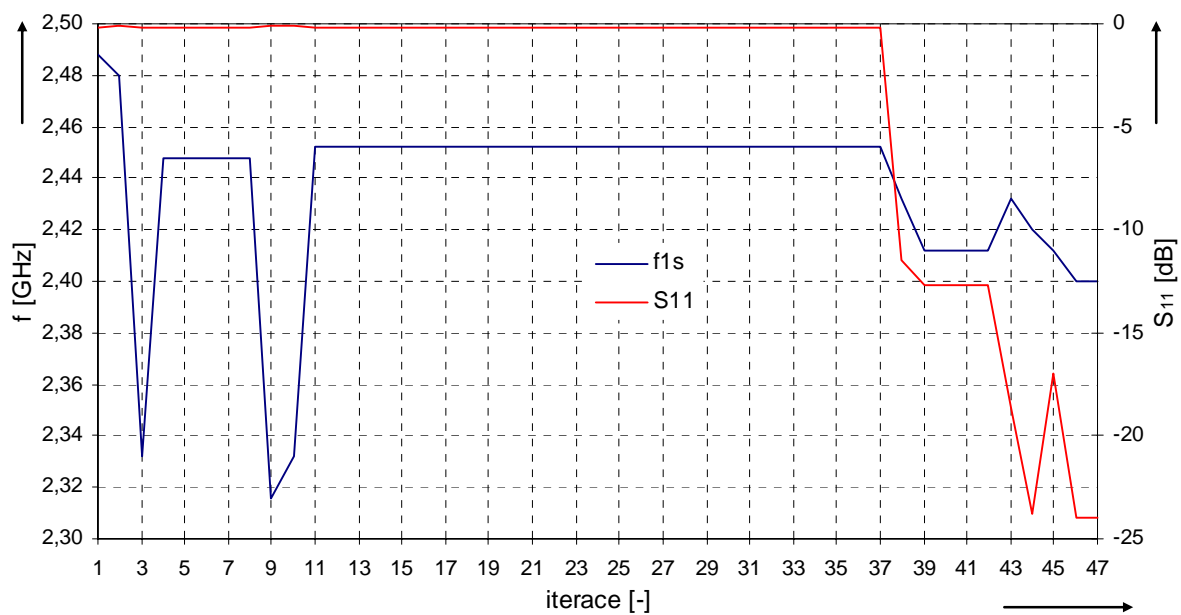
**Obr. 5-46** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 5. mravence -  $f_p = 5$  GHz



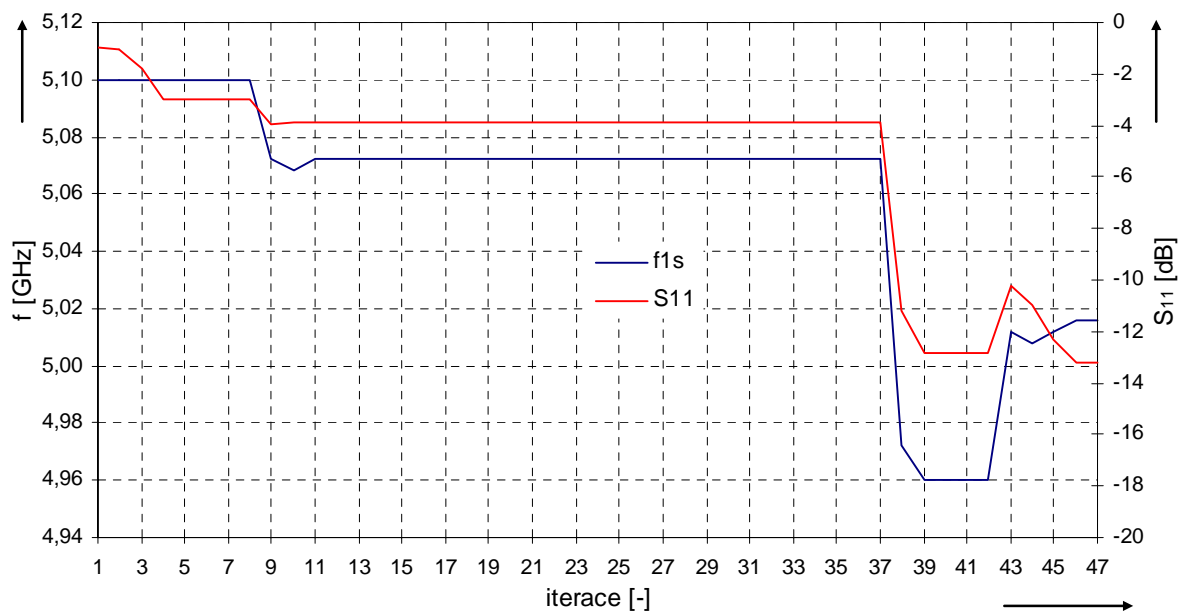
**Obr. 5-47** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 6. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



**Obr. 5-48** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 6. mravence -  $f_p = 5$  GHz

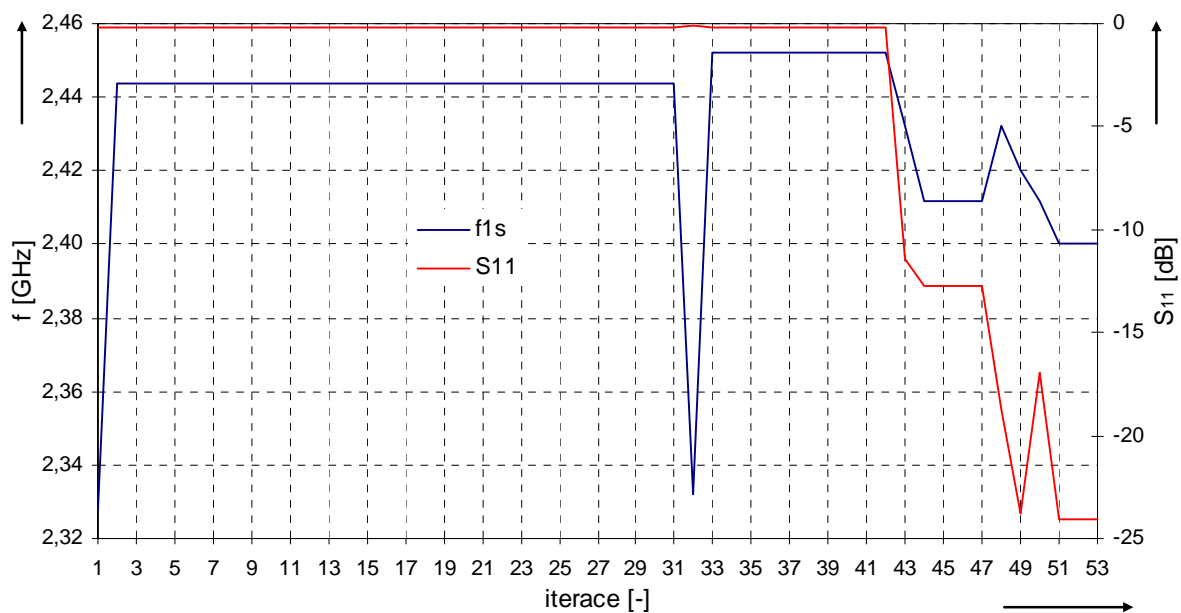


**Obr. 5-49** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 7. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz

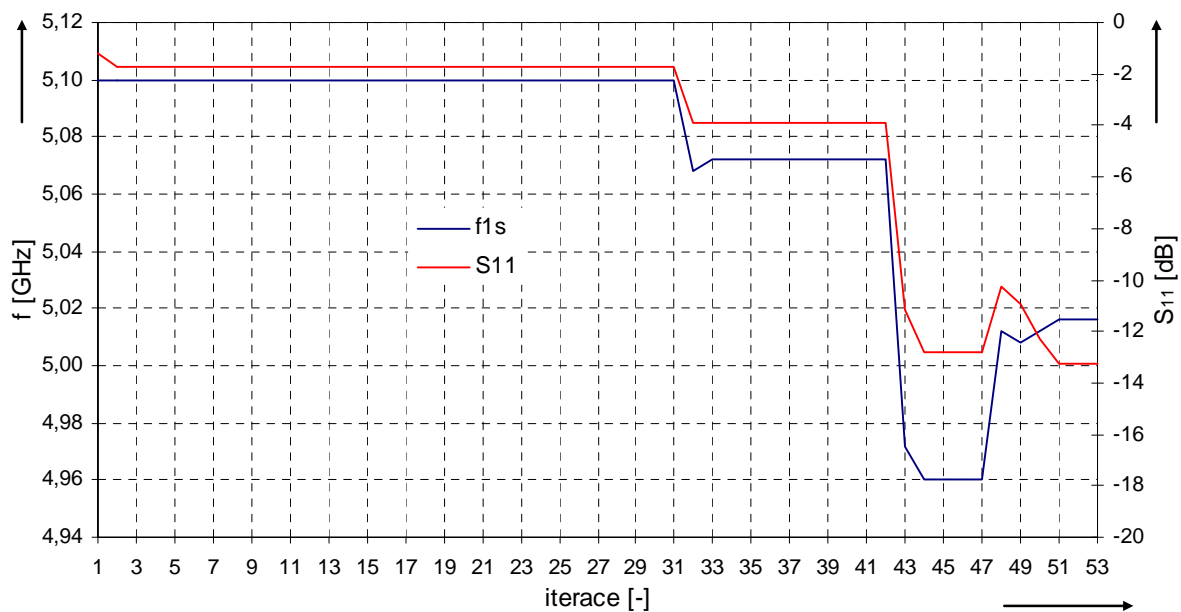


**Obr. 5-50** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 7. mravence -  $f_p = 5$  GHz

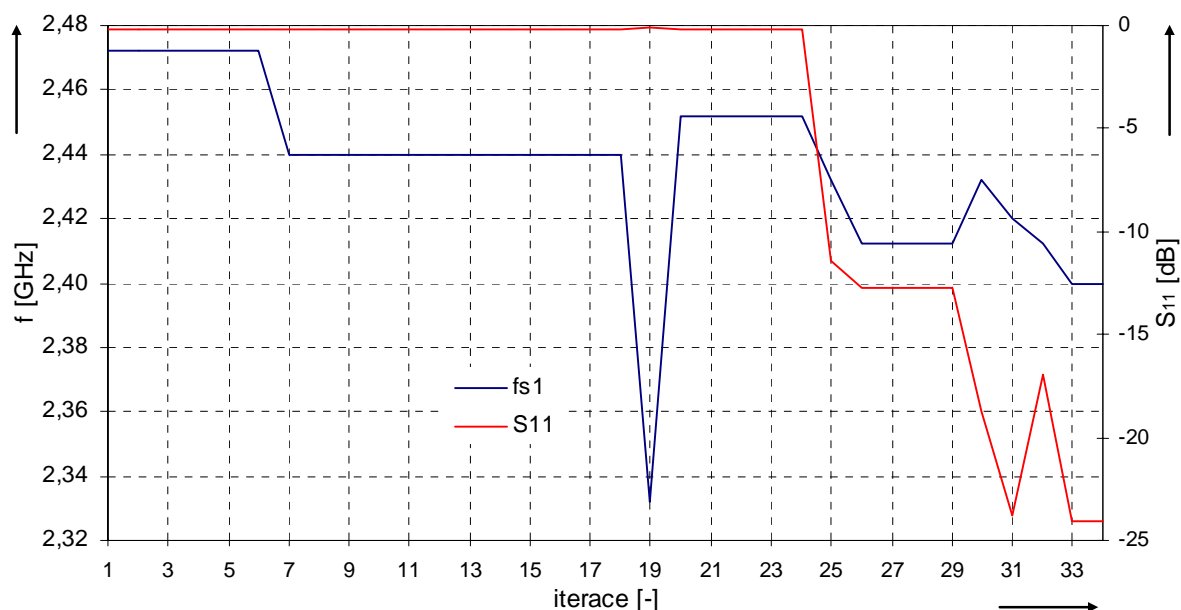




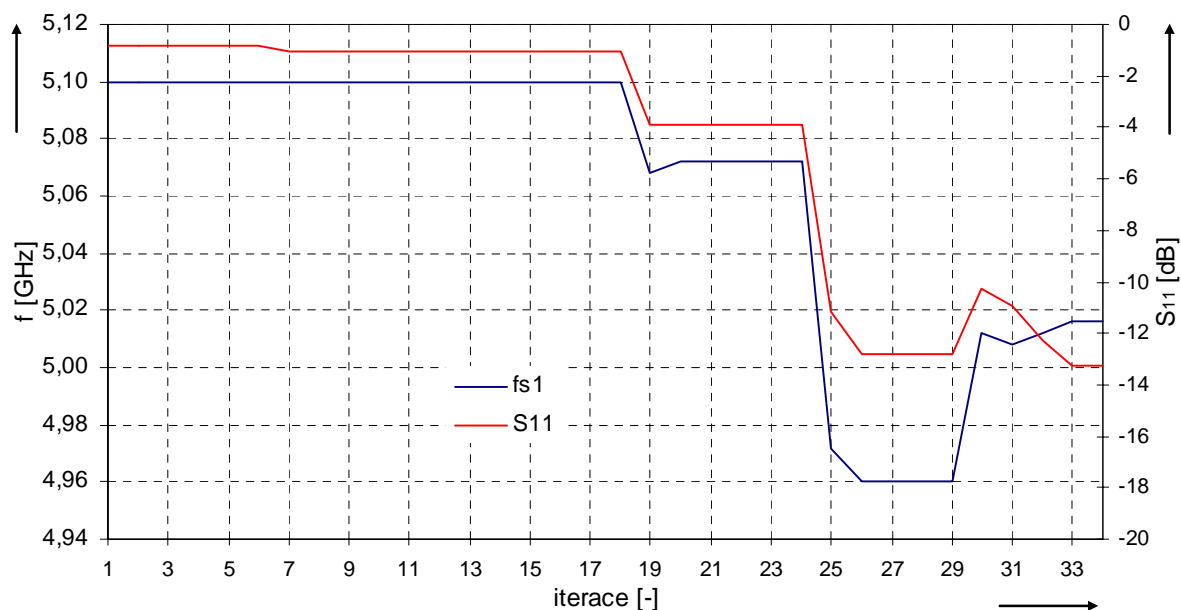
**Obr. 5-51** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 8. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



**Obr. 5-52** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 8. mravence -  $f_p = 5$  GHz



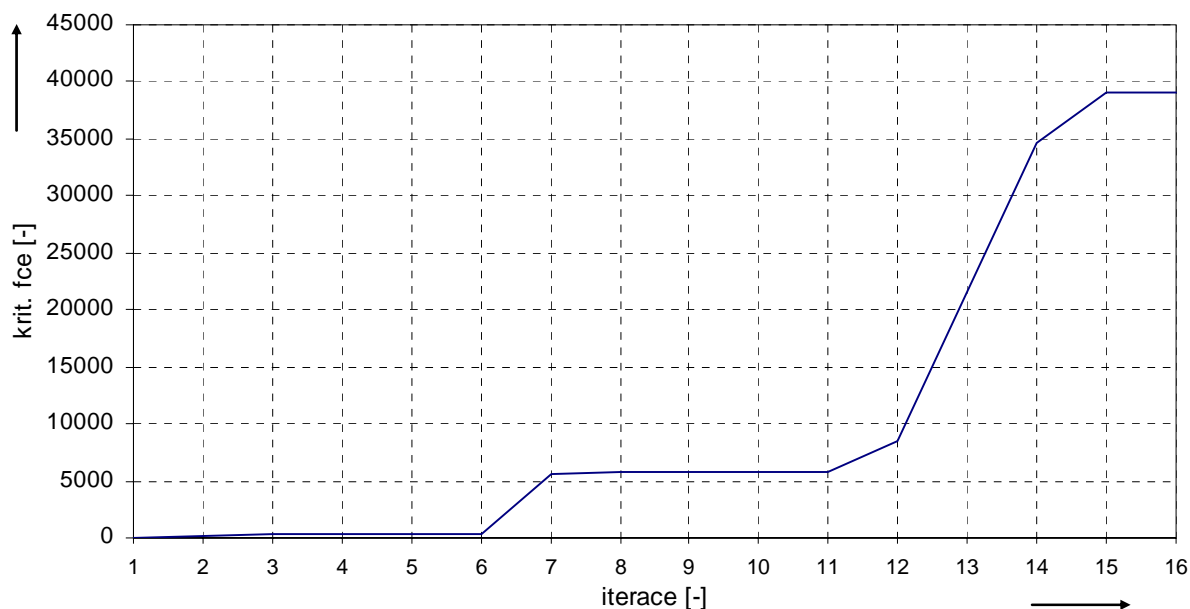
**Obr. 5-53** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 9. mravence -  $f_p = 2,4$  GHz



**Obr. 5-54** Změny frekvence a  $S_{11}$  v závislosti na iteracích pro 9. mravence -  $f_p = 5$  GHz

Ze zobrazených průběhů plyne, že nejrychleji konvertoval ke správnému řešení mravence číslo 6, kterému stačilo k nalezení správného řešení pouze 6 iterací. Následován byl mravenci číslo 3 a 5, kteří našli nejlepší řešení shodně za 7 iterací. Naopak nejdéle trvalo nalezení nejlepšího řešení čtvrtému mravenci, který na to potřeboval 61 iterací. Vzhledem k výsledkům předchozí optimalizace lze říci, že vždy se najde alespoň jeden mravenec, který

konvertuje velmi rychle k maximální hodnotě kritériální funkce a tedy nejlepšímu řešení. Nejmenší počet iterací, který je potřeba k nalezení řešení, se ovšem nedá obecně určit, závisí totiž nejen na velikosti matice kritériálních funkcí, ale i na kvalitě bodů v okolí nejlepšího řešení. Nakonec si ještě ukažme průběh kritériální funkce pro 1. mravence. Pro nalezené řešení je její hodnota rovna 39062,5



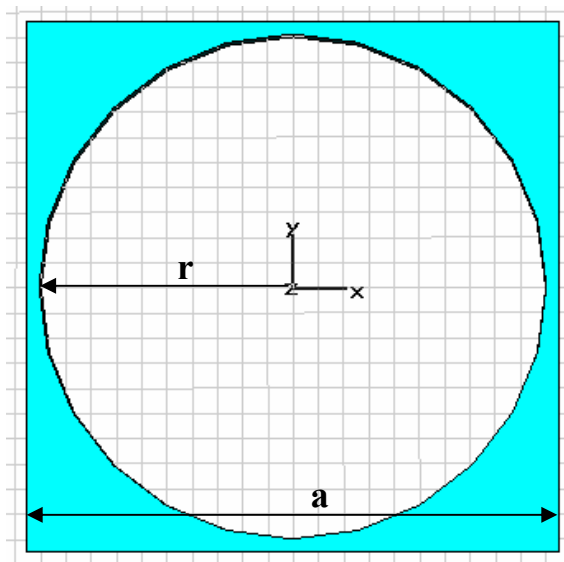
**Obr. 5-55** Změny kritériální funkce v jednotlivých iteracích pro 1. mravence

### 5.3.2 Návrh substrátu s elektromagnetickými zádržnými pásmy (EBG)

V této části je ukázán postup při návrhu substrátu s elektromagnetickými zádržnými pásmy. Vzhledem k složitosti modelování struktur s jinou než čtvercovou mřížkou je velmi komplikované, omezíme se v této části pouze na ni. Také budeme uvažovat pouze vzduchové díry v substrátu. Začneme tím, že z map dostupných v literatuře [7] odečteme pro TM vidy hodnotu normované frekvence ( $f \cdot a/c$ ) a příslušný poměr  $r/a$ . Parametr  $a$  představuje hodnotu mřížkové konstanty, neboli určuje vzdálenost středů děr v dielektriku od sebe. Parametr  $r$  je pak poloměr vzduchové díry (viz obr. 5-56). Před návrhem je třeba se rozhodnout, na kterou ze dvou frekvencí budeme EBG strukturu navrhovat. V našem případě je vhodnější vybrat si vyšší kmitočet (5 GHz), protože s klesající frekvencí se výrazně zvětšuje velikost buněk a tím také výrazně narůstá velikost celé antény.

Po provedení odečtu byly získány následující rozměry elementární buňky:

- $a = 21 \text{ mm}$
- $r = 10 \text{ mm}$

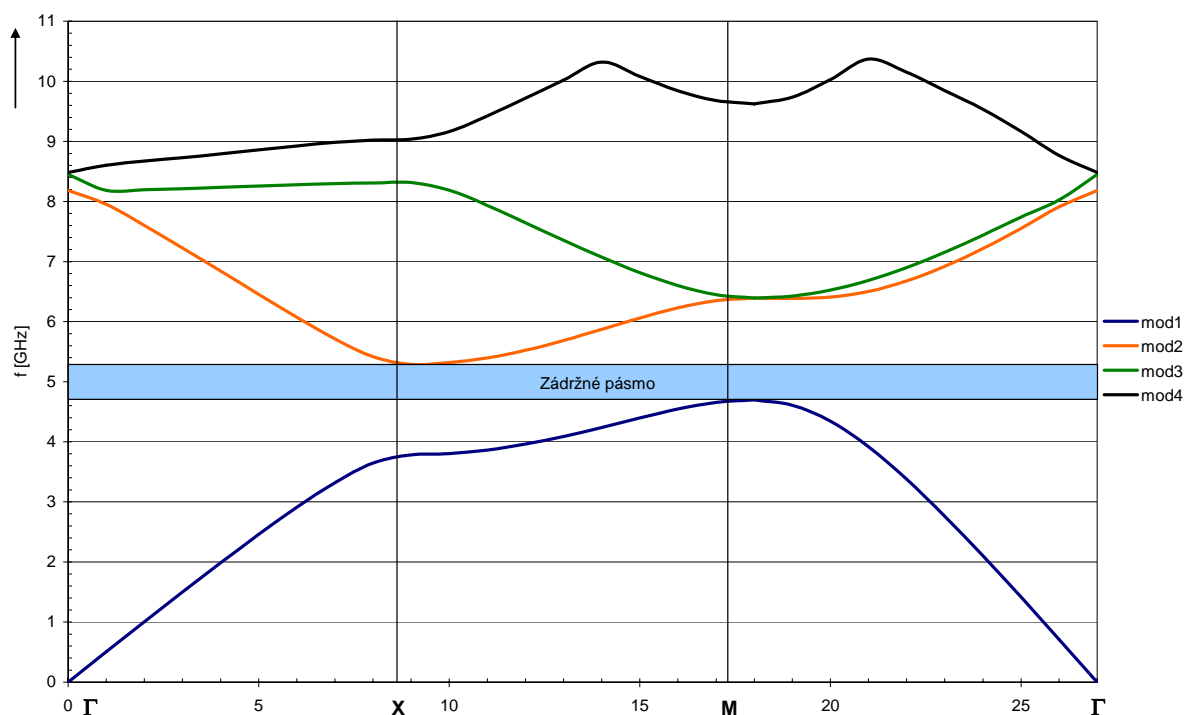


**Obr. 5-56** Elementární buňka EBG struktury

Materiál substrátu elementární buňky je shodný se substrátem, který byl použit u trojúhelníkové antény. Jde tedy o Arlon AD600 s permitivitou 6,15 a tloušťkou 1,6 mm.

Pokud známe rozměry elementární buňky, můžeme přistoupit k vlastní analýze. Ta byla provedena pomocí *CST Microwave Studio*, kdy využijeme metodu vlastních módů (*Eigenmode Solver*). Na okraje buňky je nutné aplikovat periodické okrajové podmínky (*Periodic Boundary Conditions*), čímž zajistíme modelování buňky jako periodické struktury. Pro každý směr je nutné nastavit fázový posuv (*Periodic Boundary Phase Shift*), který odpovídá skalárnímu součinu vlnového vektoru  $k$  s příslušným základním mřížovým vektorem. Fázové posuny pak určují složky vlnového vektoru, tedy bod v recipročním prostoru. Pro každé nastavení fázového posuvu provedeme spuštění *Eigenmode Solveru*, čímž získáme závislost frekvencí Blochových vidů na vlnovém vektoru, tedy hledanou disperzní charakteristiku, jejímž grafickým zobrazením je disperzní diagram.

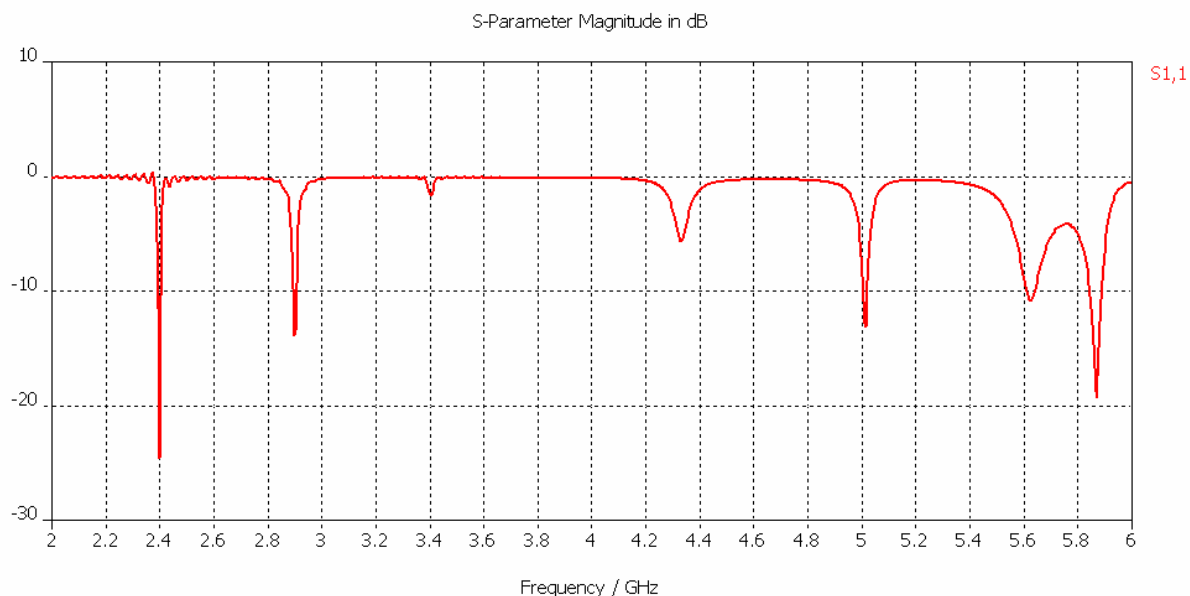
Pro naši strukturu byl po namodelování získán disperzní diagram, jenž je zobrazen na obr. 5-57. Jsou v něm vyznačeny hranice nedělitelné Brillouinovy zóny a také zádržné pásmo, které se nachází mezi 1. a 2. TM videm. To sahá od 4,698 GHz do 5,289 GHz. To představuje šířku pásma 0,591 GHz neboli 11,8%.



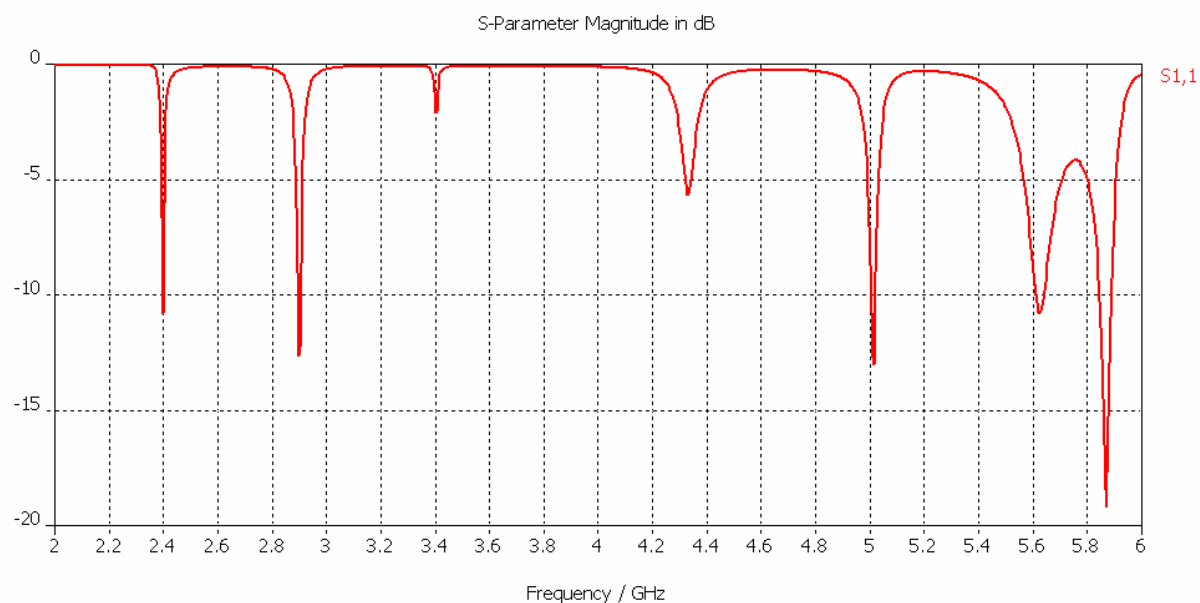
**Obr. 5-57** Disperzní diagram pro TM vlny

### 5.3.3 Aplikace EBG struktury s čtvercovou mřížkou na model antény

Pokud chceme aplikovat na náš model antény EBG strukturu, jenž byla navržena v předchozí kapitole, bude nutné nejprve provést změnu velikosti substrátu naší antény. Obecně lze říci, že jsou potřeba alespoň 3 elementární v okolí antény (na každou stranu), aby byla zajištěna správná funkčnost EBG struktury. Při velikosti mřížkové konstanty  $a = 21$  mm a devíti buňkách na hraně substrátu to představuje velikost substrátu 189 mm. Je ovšem vhodné přidat ještě alespoň 5 mm na každou stranu, aby byla zajištěna možnost anténu vyrobit. Výsledná velikost substrátu antény je pak 199 mm. Všechny ostatní rozměry byly zachovány. Není tedy nutné zobrazovat náčrt antény, ale je možné přejít rovnou k zobrazení výsledků. Nejprve se podívejme, jakým způsobem se změní průběh činitele odrazu  $S_{11}$  (obr. 5-57). Na frekvenci 2,4 GHz došlo k mírnému zlepšení  $S_{11}$  na hodnotu -24,56 dB, na frekvenci 5,016 GHz naopak k mírnému zhoršení na hodnotu -13,09 dB. Pokud použijeme AR filtr na odstranění překmitů získáme průběh na obr. 5-58, kde je  $S_{11}$  na 2,4 GHz rovno -10,77 dB a na 5,016 GHz se rovná -12,98 dB. Z toho plyne, že došlo k zhoršení úrovně přizpůsobení na kmitočtu 2,4 GHz a naopak na kmitočtu 5,016 GHz došlo k mírnému zlepšení (tedy paradoxně naopak než za situace, kdy AR filtr nepoužijeme).

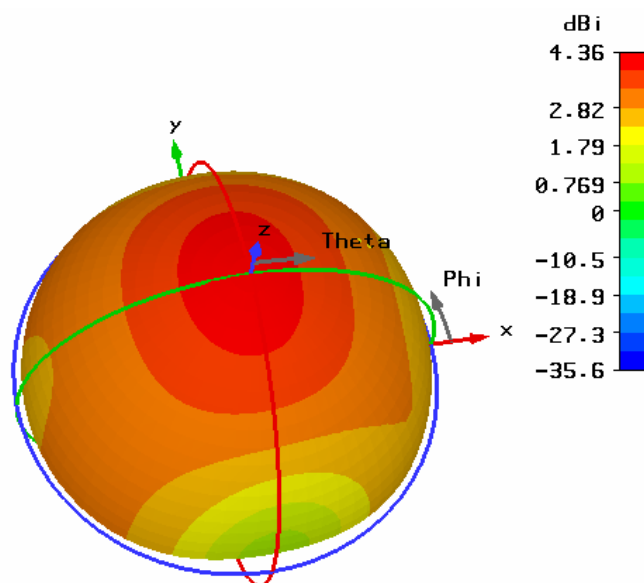


**Obr. 5-58** *Průběh  $S_{11}$  pro trojúhelníkovou anténu se zvětšeným substrátem*



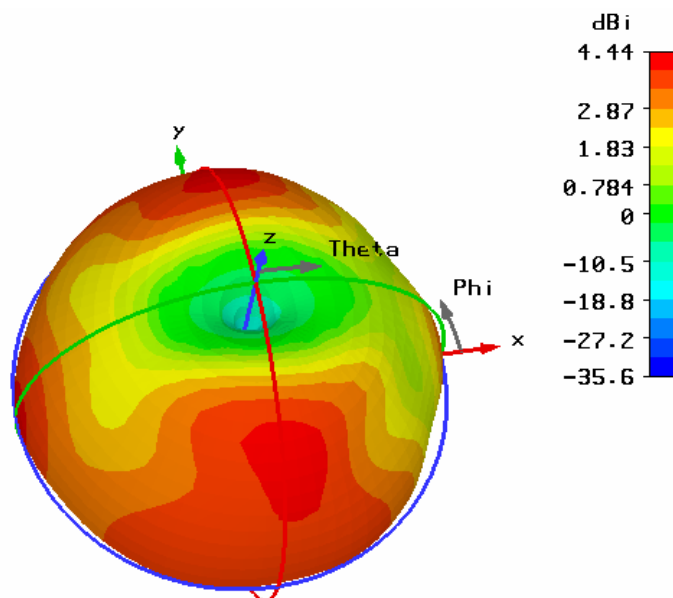
**Obr. 5-59** *Průběh  $S_{11}$  pro trojúhelníkovou anténu se zvětšeným substrátem - AR filtru*

Nyní si ukážeme vliv zvětšení substrátu na směrové charakteristiky. Začneme opět s 3D směrovou charakteristikou na 2,4 GHz (obr. 5-60). Z této charakteristiky je vidět, že se zvětšil maximální zisk antény na 4,358 dBi. Také došlo k mírnému poklesu účinnosti antény na 0,618 (tedy v řádu tisícín). Vzhledem k tomu, že v jednotlivých rovinách nedošlo k výraznějším změnám, není nutné uvádět podrobné zobrazení těchto rovin. Pouze v rovině yz klesla šířka hlavního laloku na  $152^\circ$  (tedy o  $5^\circ$ ).

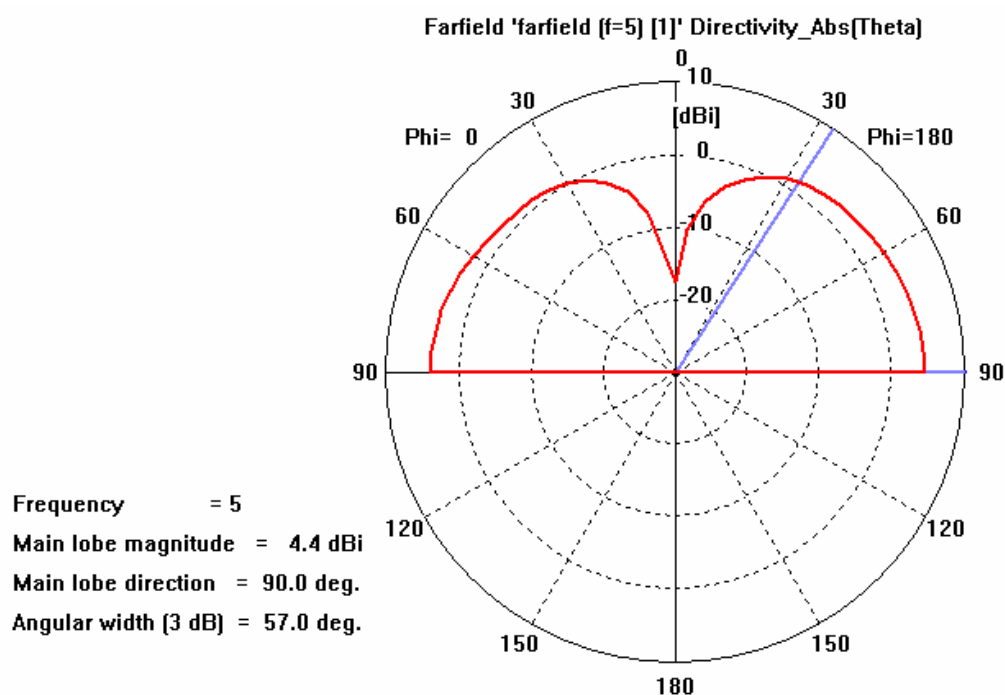


**Obr. 5-60** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény -  $f = 2,4 \text{ GHz}$ , velký substrát

Naopak na kmitočtu 5 GHz došlo poněkud výraznějším změnám. Maximální zisk antény klesl na 4,433 dBi (z 4,933 dBi). Také zde se objevil mírný pokles účinnosti antény na 0,8023 (opět zanedbatelný). Anténa září také více do stran než v případě malého substrátu, což je vidět především ze směrových charakteristik v jednotlivých rovinách (obr. 5-62 a 5-63).

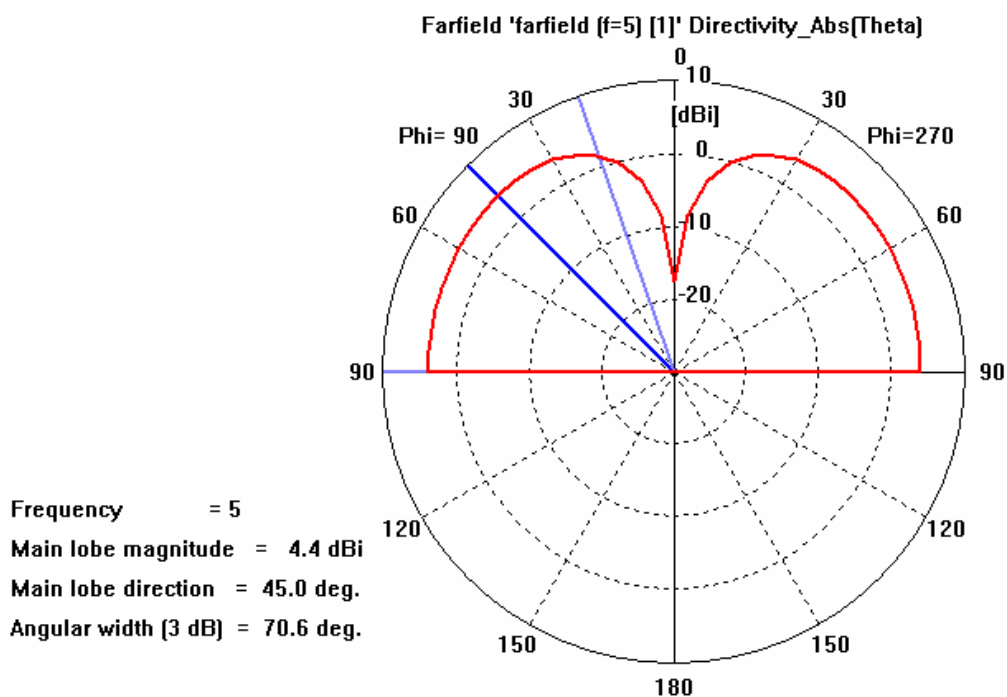


**Obr. 5-61** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény -  $f = 5 \text{ GHz}$ , velký substrát



**Obr. 5-62** Směrová charakteristiky trojúhelníkové antény v rovině  $xz$  -  $f = 5$  GHz, velký substrát

Maximum zisku v rovině  $xz$  je pootočeno o  $90^\circ$  směrem k hraně trojúhelníka (tedy směrem do záporné poloosy  $x$ ) a má hodnotu 4,351 dBi. Šířka tohoto laloku je  $57^\circ$ . V druhém směru (tedy ke špici trojúhelníka – kladná poloosa  $x$ ) je maximum zisku 3,864 dBi, a je natočeno také o  $90^\circ$ . Šířka tohoto laloku je  $53^\circ$ .

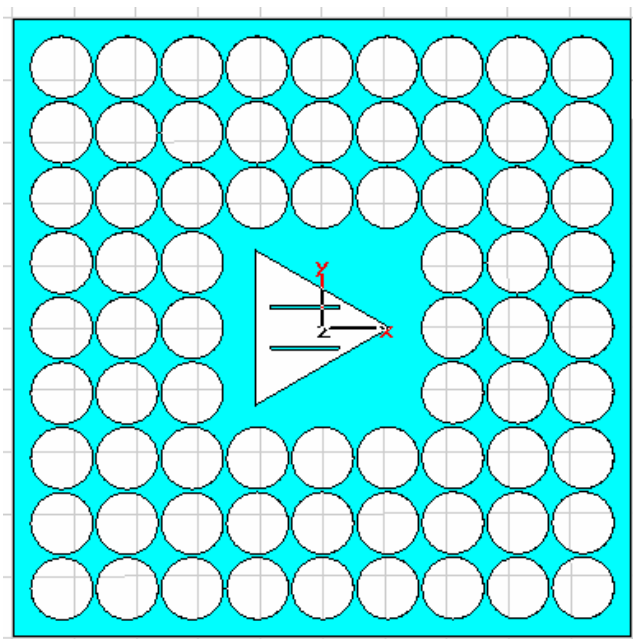


**Obr. 5-63** Směrová charakteristiky trojúhelníkové antény v rovině  $yz$  -  $f = 5$  GHz, velký substrát



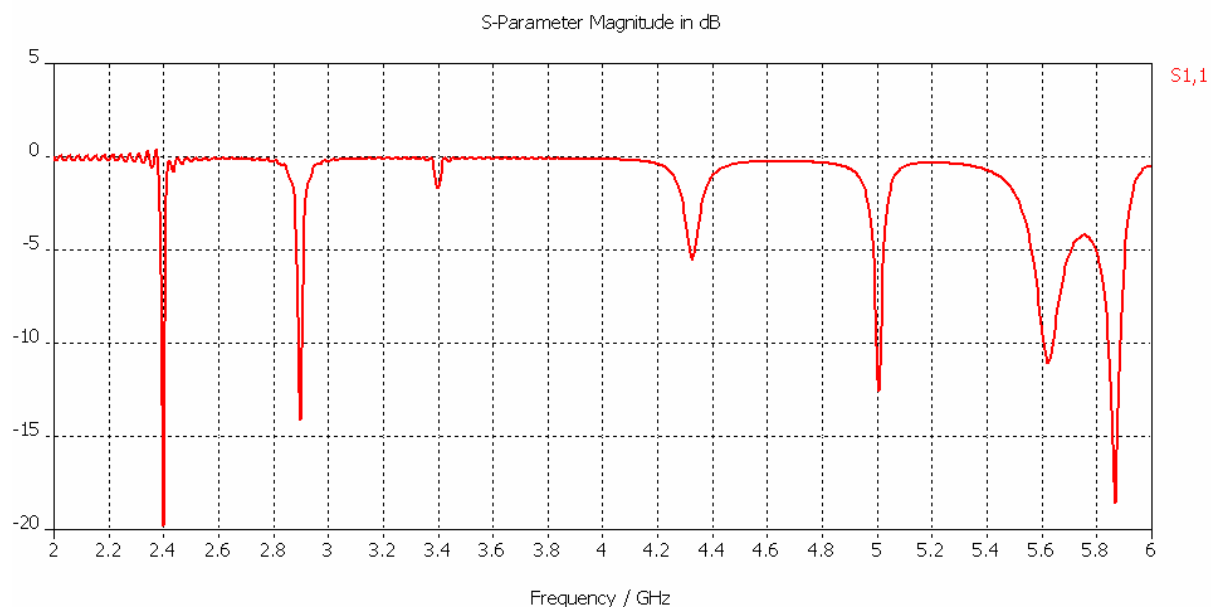
V rovině yz je umístěno maximum zisku, který je možný na této frekvenci, tedy 4,433 dBi. Stejně jako v případě malého substrátu i zde máme dva hlavní laloky, jenž vzájemně pootočený o  $90^\circ$  (tedy o  $45^\circ$  od osy z každý). Zvětšením substrátu jsme také docílili zvýšení šířky hlavního laloku na  $70,6^\circ$  (oproti  $68,3^\circ$  v případě malého substrátu).

Po rozebrání vlastností můžeme přistoupit k analýze antény na EBG substrátu se čtvercovou mřížkou. Model antény je zobrazen na *obr. 5-64*. EBG substrát má mřížkovou konstantu  $a$  rovnu 21 mm a poloměr díry v substrátu  $r$  je roven 10 mm. Ostatní parametry jsou shodné s předchozím modelem antény na zvětšeném modelu.

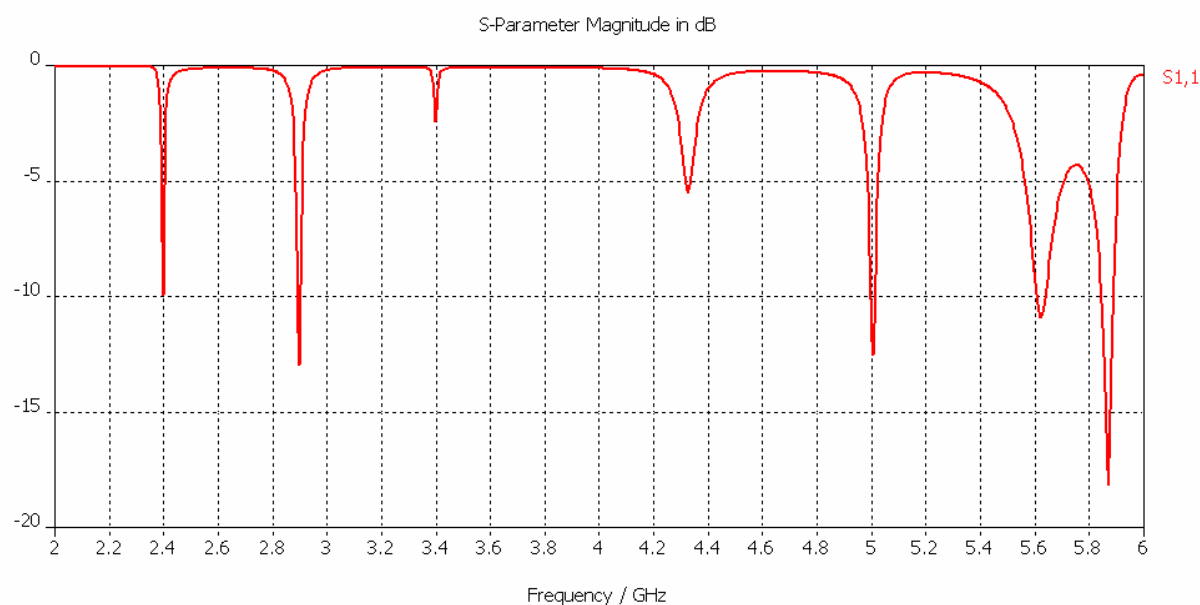


**Obr. 5-64** *Nákres trojúhelníkové antény s EBG - čtvercová mřížka*

Po provedení analýzy antény dostaneme průběh činitele odrazu  $S_{11}$ , jenž je zobrazen na *obr. 5-65*. Na frekvenci 2,4 GHz nám kleslo přizpůsobení na hodnotu -19,78 dB. Na vyšší frekvenci došlo k mírnému posuvu frekvence minima na hodnotu 5,08 GHz. Na této frekvenci je  $S_{11}$  rovno -12,55 dB, což je mírné zhoršení vůči zvětšenému substrátu. Pokud použijeme AR filtr k odstranění zákmitů, získáme graf, jenž je zobrazen na *obr. 5-66*. Z něj plyne, že přizpůsobení na 2,4 GHz klesne těsně pod hranici -10 dB, konkrétně na hodnotu -9,906 dB. Na vyšším kmitočtu nedojde prakticky k žádné změně,  $S_{11}$  je rovno -12,51 dB. Znamená to, že oproti původní anténě s malým substrátem je horší hodnota přizpůsobení na prvním kmitočtu, ovšem došlo ke zlepšení na kmitočtu, na který byla navržena EBG struktura a to jak frekvenčně (minimum je o 8 MHz blíže požadovanému kmitočtu), tak i hodnotou přizpůsobení (pokud bereme jako správný výsledek výstup AR filtru).



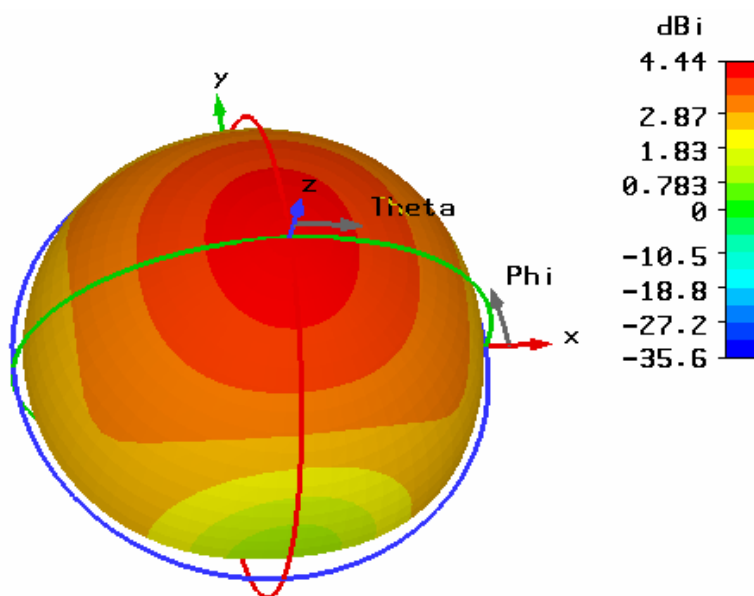
**Obr. 5-65** *Průběh  $S_{11}$  pro trojúhelníkovou anténu s EBG substrátem*



**Obr. 5-66** *Průběh  $S_{11}$  pro trojúhelníkovou anténu s EBG substrátem - AR filtr*

Nyní si rozeberme, jaký vliv mělo dodání EBG struktury do substrátu na směrové charakteristiky. Začneme opět na kmitočtu 2,4 GHz. Trojrozměrný model této směrové charakteristiky je zobrazen na *obr. 5-67*. Je z něho vidět, že zde se EBG struktura příliš neprojevila, což se dalo vcelku očekávat, protože na tento kmitočet nebyla navržena. Došlo jen k mírnému zvýšení maximální hodnoty zisku na hodnotu 4,437 dBi, což představuje nárůst oproti modelu se zvětšeným substrátem o necelou jednu desetinu decibelu. Dá se říci,

že jediná změna oproti předchozímu stavu je zmenšení šířky hlavního laloku v rovině yz na  $143,8^\circ$ . Z toho jasně plyne, že přidáním EBG struktury do substrátu, která byla navržena na vyšší kmitočet, jsme docílili prakticky jen vyšší směrovosti antény v rovině yz. Nárůst zisku na tomto kmitočtu je způsoben je totiž více způsoben zvětšením substrátu než dodáním EBG struktury. Tato se také projevila mírný nárůstem účinnosti antény, ovšem opět pouze v řádu tisícín a tedy zanedbatelně.

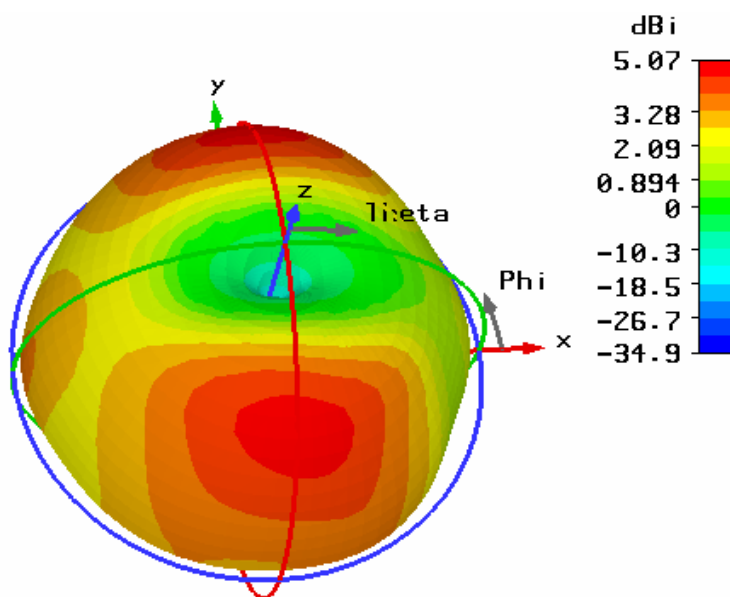


**Obr. 5-67** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény -  $f = 2,4 \text{ GHz}$ , EBG substrát

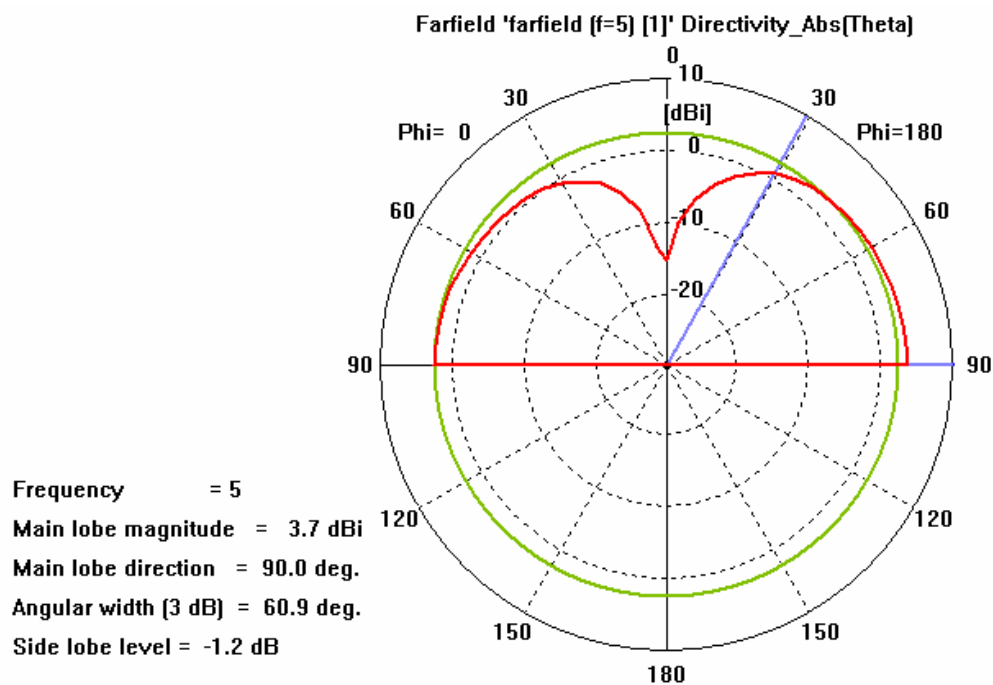
Na kmitočtu 5 GHz jsou změny ve směrových charakteristikách výraznější, což se dá vcelku očekávat neboť na tento kmitočet je struktura navržena (přesněji na pásmo 4,698 až 5,289 GHz pro připomenutí). Nejprve si tedy ukažme trojrozměrný model směrové charakteristiky na kmitočtu 5 GHz. Je patrné, že došlo k nárůstu maximálního zisku antény a to na hodnotu 5,065 dBi, což je o 0,632 dB více než v případě zvětšeného substrátu a o 0,132 dB více než při malém substrátu. Tento nárůst není nijak zásadní, aby ospravedlnil použití zhruba 7 krát větší plochy substrátu. Dodání EBG struktury se ovšem pozitivně podepsalo na zvýšení účinnosti antény a to na hodnotu 0,9012, což představuje nárůst o zhruba jednu desetinu. Dále je ale i z 3D modelu vidět, že došlo ke zvýšení směrovosti antény a také bylo částečně potlačeno vysílání přímo v ose x. Konkrétní čísla si ukážeme na směrových charakteristikách v jednotlivých rovinách.

Začneme rovinou xz na obr. 5-69. Z něj je vidět, že anténa má maximum vyzařování ve směru k hraně trojúhelníka (záporná poloosa x), kde dosahuje maxima zisku 3,674 dBi. Tato hodnota je zhruba o 0,7 dBi nižší než u antény se zvětšeným substrátem a je obdobné

jako u antény s malým substrátem. Ve směru ke špici trojúhelníka je maximum 2,515 dBi. Tyto hodnoty zisku se příliš nehodí pro použití k vysílání a tím i celá anténa není v této rovině a zároveň na tomto kmitočtu příliš použitelná.

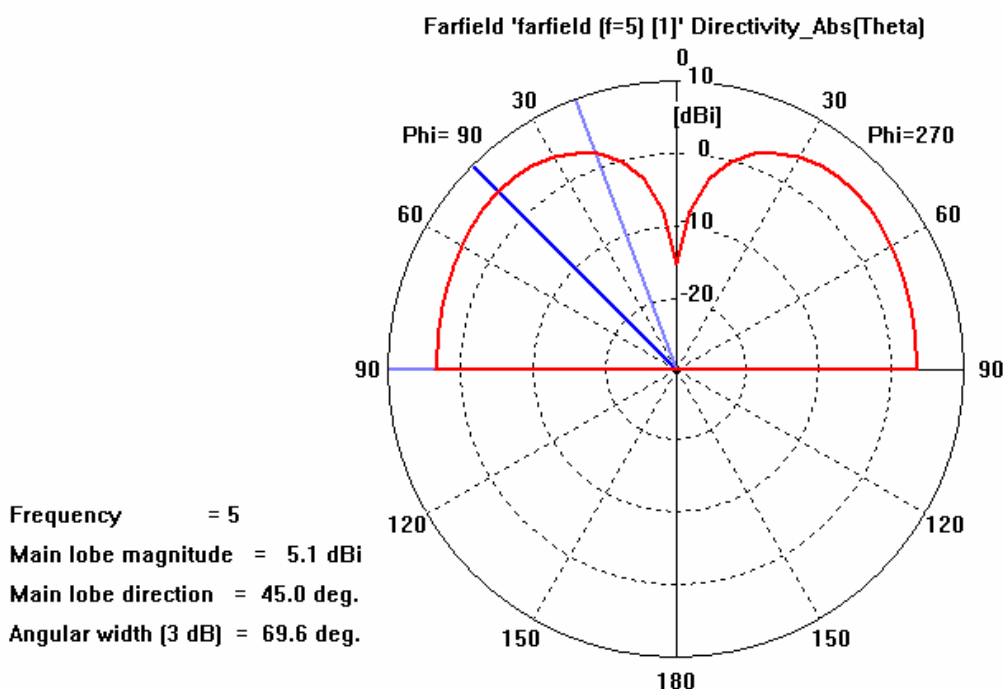


**Obr. 5-68** 3D model směrové charakteristiky trojúhelníkové antény -  $f = 5$  GHz, EBG substrát



**Obr. 5-69** Směrová charakteristiky trojúhelníkové antény v rovině xz -  $f = 5$  GHz, EBG substrát

V rovině  $yz$  (obr. 5-70) stále zůstávají 2 souměrné laloky posunuté vzájemně o  $45^\circ$ . Maximální úroveň zisku v těchto lalocích je 5,065 dBi a šířka laloků klesla o jeden stupeň na  $69,6^\circ$ . V této rovině je možné použít anténu k vysílání.



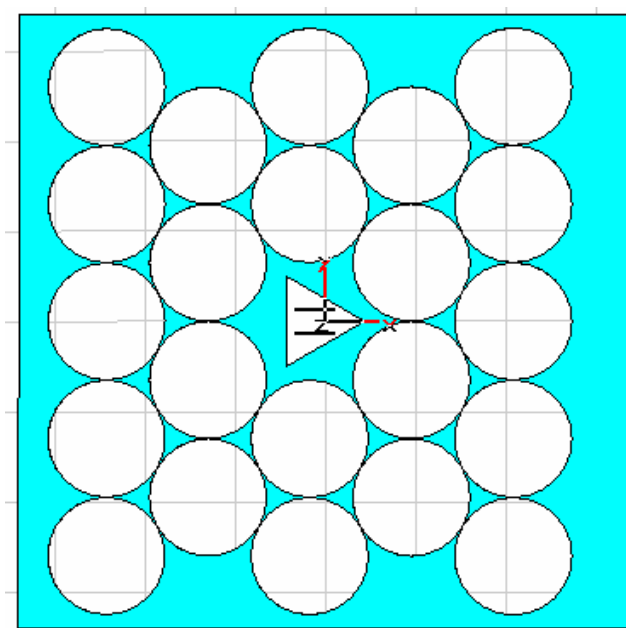
**Obr. 5-70** Směrová charakteristiky trojúhelníkové antény v rovině  $yz$  -  $f = 5$  GHz, EBG substrát

### 5.3.4 Aplikace EBG struktury s trojúhelníkovou mřížkou na model antény

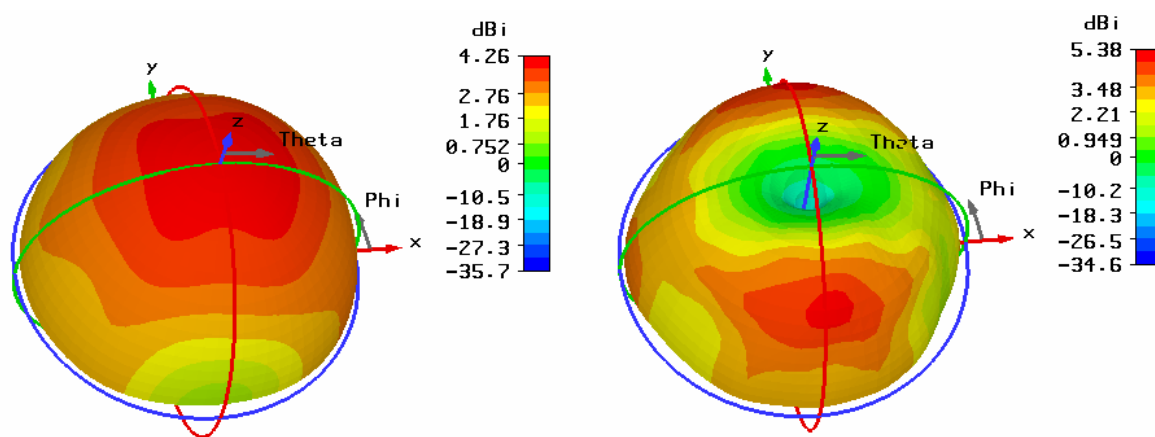
V této části se zaměříme na vliv trojúhelníkové mřížky EBG struktury na vlastnosti antény. Anténa s trojúhelníkovou mřížkou je zobrazena na obr. 5-71. Tato mřížka je navržena tak, že v okolí 5 GHz je zádržné pásmo mezi 5. a 6. Blochovým videm. Díky tomu je větší velikost mřížkové konstanty  $a$  (65 mm) i poloměru díry  $r$  (v tomto případě je  $r$  rovno  $a/2$ , neboli 32,5 mm). Tyto rozměry byly dodány vedoucím diplomové práce vzhledem k tomu, že není možné provést její analýzu v *CST Microwave Studio*. Velikost substrátu se zvětšila na 340x340 mm. Vzhledem k tomu, že průběh  $S_{11}$  je stále stejný, není potřeba si ho znovu ukazovat a stačí uvést, že na 2,4 GHz je jeho hodnota rovna -20,77 dB (-12,91 dB pro AR filtr) a na 5,016 GHz -13,18 dB (-13,47 dB pro AR filtr). Tyto hodnoty jsou tedy mírně vyšší než při použití čtvercové mřížky.

Vliv trojúhelníkové mřížky EBG struktury na směrové charakteristiky je ukázán na obr. 5-72. Jde o trojrozměrné zobrazení směrových charakteristik, ze kterých plyne, že na

frekvenci 2,4 GHz je hodnota maximálního zisku nižší při použití čtvercové mřížky. Konkrétně je to 4,262 dBi oproti 4,437 dBi. Naopak je mírně vyšší účinnost antény (0,6325). Naproti tomu u kmitočtu 5 GHz došlo ke zlepšení maximální hodnoty zisku z 5,065 dBi na hodnotu 5,377 dBi, avšak zároveň klesla účinnost na 0,7832. Vzhledem k tomu, že se směrové charakteristiky pro trojúhelníkovou mřížku svým tvarem příliš neliší od těch pro čtvercovou, není nutné uvádět zobrazení v jednotlivých rovinách.



**Obr. 5-71** Náčrt trojúhelníkové antény s EBG - trojúhelníková mřížka



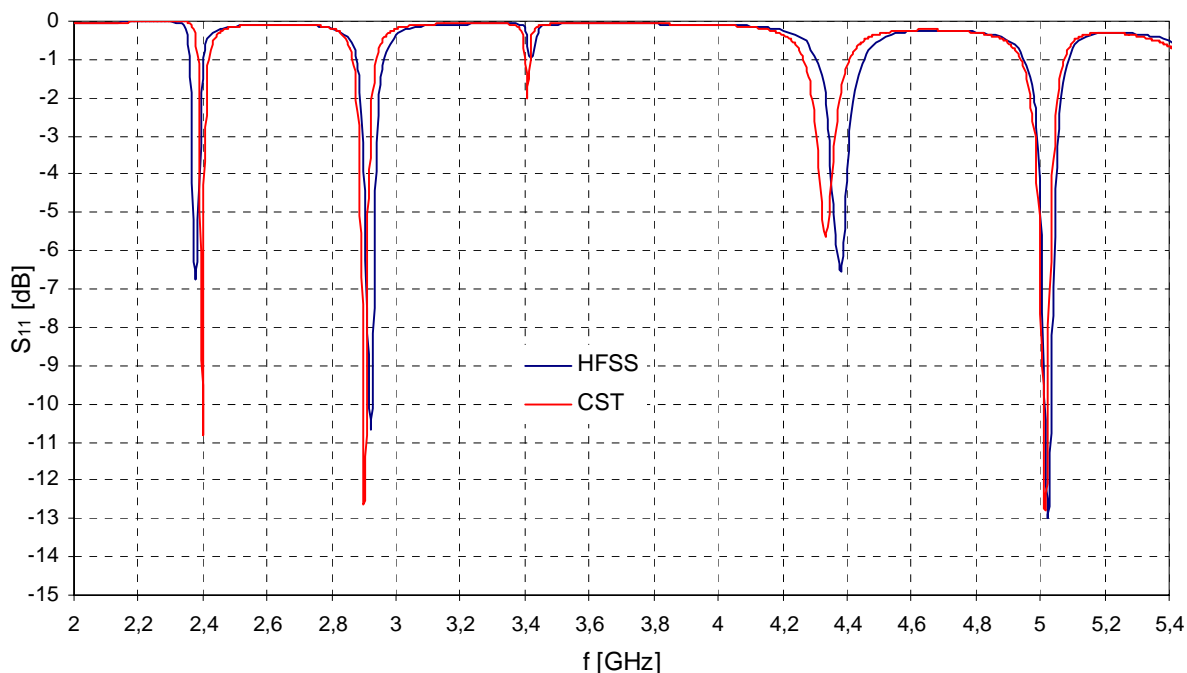
**Obr. 5-72** 3D zobrazení směrových charakteristik pro trojúhelníkovou anténu s EBG - trojúhelníková mřížka

Z těchto výsledků plyne, že trojúhelníková mřížka dosahuje lepších výsledků než čtvercová. Cenou za to je, že se velké zvětšení plochy substrátu a také náročnější výroba,

vzhledem k tomu, že mezi jednotlivými vzduchovými dírami v dielektriku není žádný rozestup. Ovšem i přes určitá zlepšení je třeba říci, že EBG struktury v této konfiguraci není příliš vhodné používat na naše kmitočty, protože zlepšení vlastností, které jimi dosáhneme, není nijak výrazné a jen těžko vyváží dražší výrobu. Při použití vyšších frekvencí se výrazně snižuje velikost elementárních buněk, což se příznivě projevuje na množství substrátu nutného k výrobě antény.

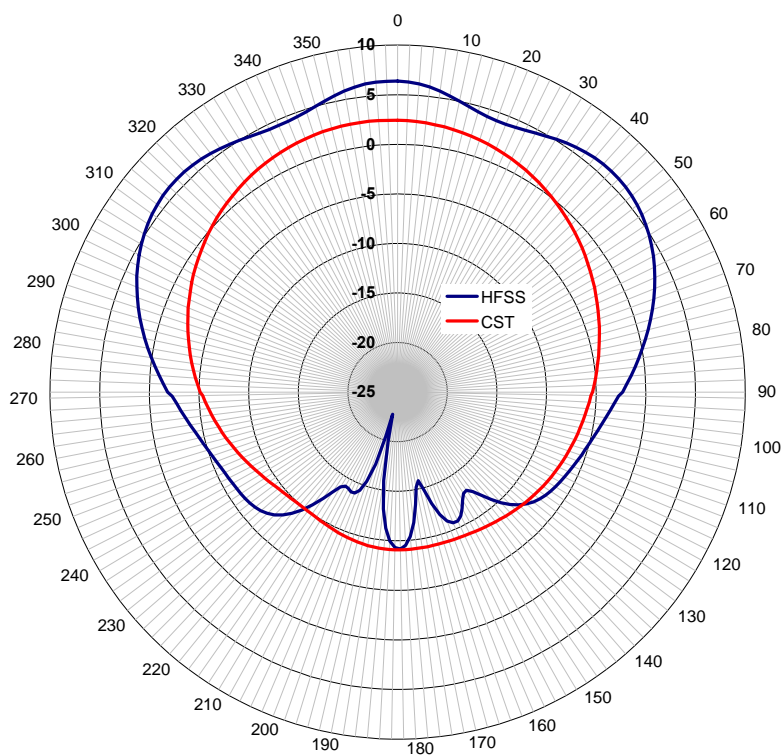
## 5.4 Ověření výsledů optimalizace

Vzhledem k ceně substrátu a náročnosti výroby bylo upuštěno od experimentálního ověření výsledků. K tomuto ověření byl použit program *Ansoft HFSS*. Pro ověření byl vybrán zoptimalizovaný model trojúhelníkové antény na malém substrátu. Porovnání průběhů činitele odrazu na vstupu antény je zobrazen na obr. 5-72. Průběh  $S_{11}$  z *Ansoft HFSS* byl porovnán s průběhem z *CST Microwave Studio* po použití AR filtru, protože tyto výsledky se dají považovat za více reálné. Jak je vidět, bylo dosaženo velmi dobré shody obou průběhů. Pouze na kmitočtu 2,4 GHz je minimum  $S_{11}$  z HFSS mírně posunuto oproti minimu z CST a má také horší hodnotu (tedy vyšší). Naproti tomu na kmitočtu 5 GHz bylo dosaženo prakticky dokonale shody, a to jak frekvenčně, tak i úrovní  $S_{11}$ .

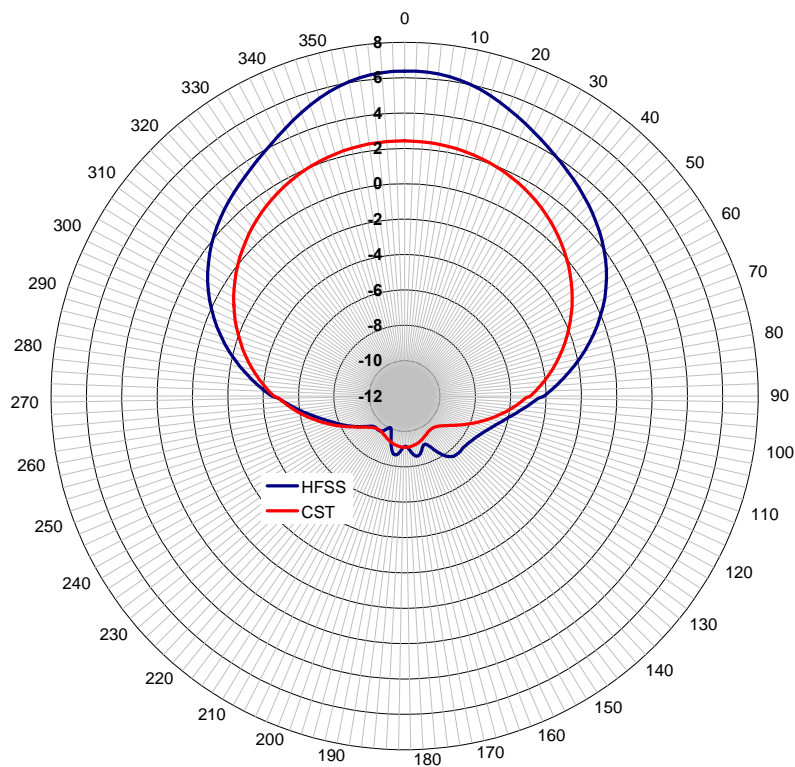


**Obr. 5-73** Porovnání průběhu  $S_{11}$  z CST a HFSS

Dále byly ověřovány směrové vlastnosti antény. Výsledkem je následující čtveřice obrázků, která zobrazuje směrové charakteristiky v jednotlivých rovinách a pro jednotlivé kmitočty. Rovina xz odpovídá  $\phi = 0^\circ$  a rovina yz  $\phi = 90^\circ$ .

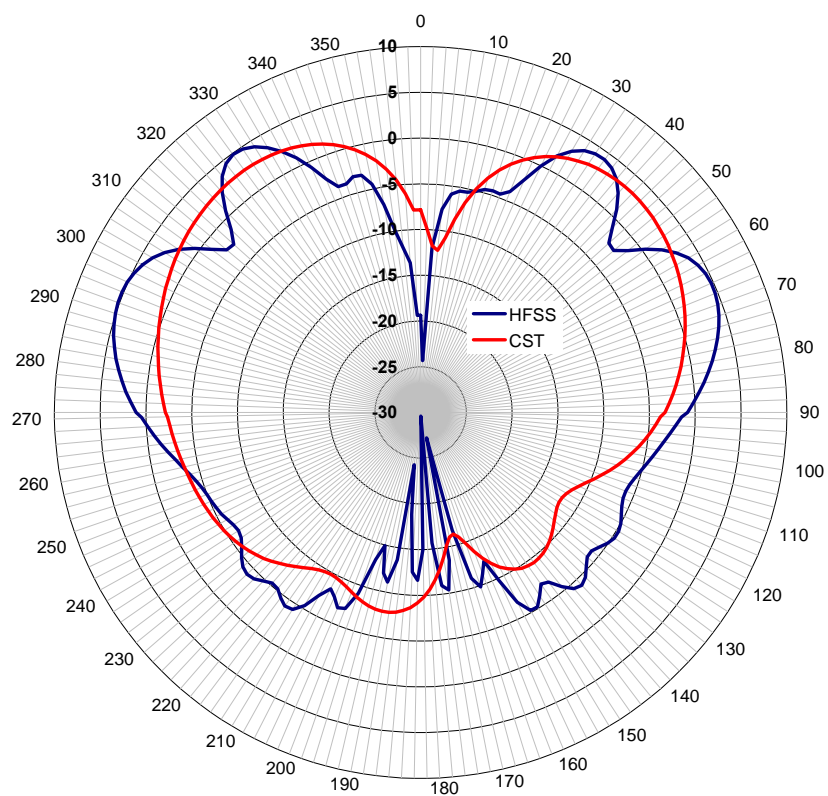


**Obr. 5-74** Porovnání směrových charakteristik v rovině xz -  $f = 2,4$  GHz

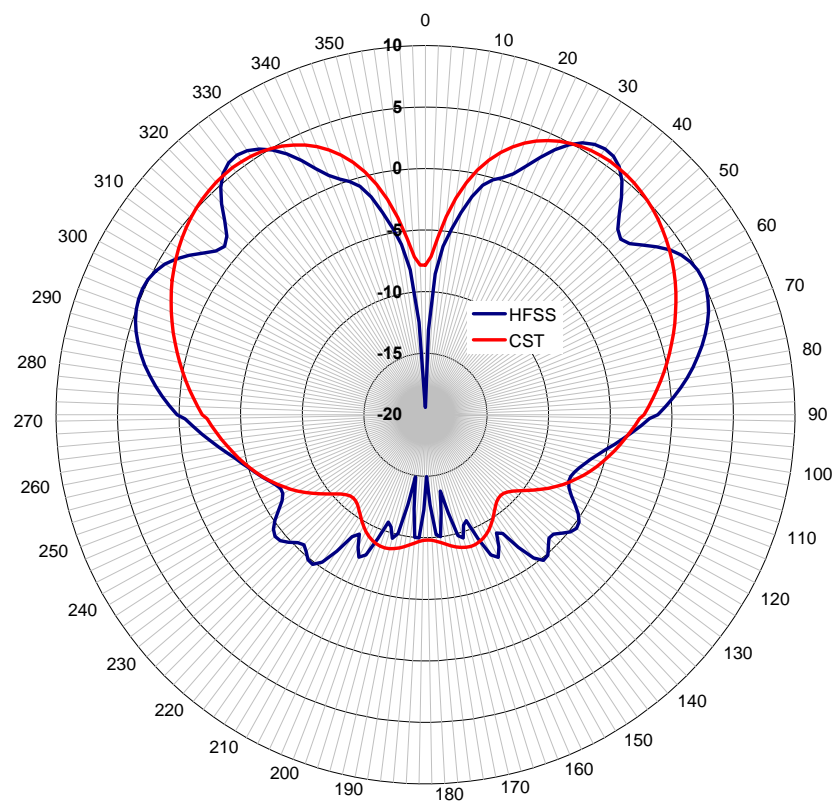


**Obr. 5-75** Porovnání směrových charakteristik v rovině yz -  $f = 2,4$  GHz





**Obr. 5-76** Porovnání směrových charakteristik v rovině  $xz$  -  $f = 5$  GHz



**Obr. 5-77** Porovnání směrových charakteristik v rovině  $yz$  -  $f = 5$  GHz

Pokud porovnáme směrové charakteristiky pro 2,4 GHz, tak zjistíme, že vcelku tvarově odpovídají, pouze směrová charakteristika získaná z HFSS dosahuje vyšších hodnot maximálního zisku. Směrové charakteristiky na kmitočtu 5 GHz se shodují mnohem více, a to jak tvarově, tak i úrovní. Pouze průběh z HFSS je více členitý než průběh z CST.

## 6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s optimalizací vícepásmových planárních antén na EBG substrátech tzv. kolonií mravenců. Nejprve byla rozebrána teorie planárních antén, optimalizace kolonií mravenců a periodických struktur, do kterých patří struktury EBG. Poté byla tato naprogramována v jazyku VBA a takto naprogramovaný skript byl použit k optimalizaci dvou modelů planárních antén. Tyto modely byly vytvořeny v prostředí *CST Microwave Studio*. U obou typů antén se podařilo dosáhnout požadovaných výsledků. U antény se dvěma zářezy ve tvaru písmene U bylo také provedeno porovnání naprogramované optimalizace kolonií mravenců s metodami dostupnými v *CST Microwave Studio*. Z tohoto porovnání vyšli sice mírně odlišné rozměry antény, ovšem s obdobnými výsledky. Lze tedy říci, že naprogramovaná metoda je zcela funkční a schopna dosahovat dobrých výsledků. Je ale také třeba říci, že je časově náročná vzhledem k nutnosti provést dostatečně velký počet analýz.

V další části byla metodou kolonie mravenců aplikována na model planární antény, jejíž flíček má tvar trojúhelníku. Také tuto anténu se podařilo zoptimalizovat na požadované frekvence. Poté byl standardní substrát nahrazen EBG substrátem, jenž byl navržen na vyšší kmitočet. Důvodem byla snaha použít menší velikost substrátu s ohledem na případnou realizaci (s rostoucím kmitočtem klesá velikost elementární buňky a tím ve výsledku i celé antény) a také to, že směrová charakteristika měla nižším kmitočtu přibližně požadovaný tvar. Byl zkoumán vliv dvou typů mřížek EBG struktury a to čtvercové a trojúhelníkové. Čtvercová mřížka byla navržena za použití mapy zádržných pásem a byly ověřeny její vlastnosti pomocí disperzního diagramu. Použitím EBG substrátu bylo sice dosaženo lepších výsledků (konkrétně vyššího zisku antény), ovšem toto zlepšení nebylo nijak výrazné v porovnání s původním modelem antény. Při porovnání výsledků dosažených s EBG substrátem a výsledků dosažených se standardním substrátem, který byl ovšem zvětšen na velikost nutnou pro použití EBG substrátu, bylo zjištěno, že zlepšení je výraznější. Také bylo zjištěno, že při použití trojúhelníkové mřížky je dosaženo lepších výsledků než se čtvercovou mřížkou. Daní za toto zlepšení jsou ovšem větší rozměry antény, protože tato mřížka byla navržena tak, aby na vyšším kmitočtu (5 GHz) bylo 2. zádržné pásmo mezi 5. a 6. Blochovým videm.

Dále mělo dojít k realizaci a experimentálnímu ověření výsledků. Od toho bylo na pokyn vedoucího práce upuštěno vzhledem k ceně a náročnosti výroby a výsledky byly ověřeny v programu Ansoft HFSS. Z porovnání plyne, že bylo dosaženo dobré shody mezi

průběhy činitele odrazu na vstupu antény v obou programech. Pro porovnání s HFSS byl použit výstup auto regresivního filtru, jenž odstraňuje z průběhu  $S_{11}$  zvlnění. Při porovnání směrových charakteristik bylo zjištěna relativně dobrá shoda na kmitočtu 5 GHz. Na kmitočtu 2,4 GHz si směrové charakteristiky odpovídají tvarem, ovšem ty získané z HFSS dosahují mnohem lepších hodnot. Tato odchylka lze připsat určité chybě při výpočtu v obou programech a také tomu, že HFSS dosahuje na tomto kmitočtu horšího přizpůsobení, které je navíc mírně posunuto směrem k nižším kmitočtům.

## 7 Seznam literatury

- [1] GANDARA, T., PEIXEIRO, C. *Compact Double U-Slotted Microstrip Path Antenna Element for GSM1800, UMTS and HiperLAN2*. Lisabon, 2004.
- [2] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů*. Elektronické skriptum. FEKT VUT v Brně, 2006.
- [3] KIN-LU WONG. *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 2002.
- [4] DORIGO, M., STÜZLE, T. *Ant Colony Optimization*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.
- [5] ČERNOHORSKÝ, RAIDA, ŠKVOR, NOVÁČEK. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. Nakladatelství VUTIUM, Brno, 1999.
- [6] JOANNOPOULOS, J. D., MEADE, R. D., WINN, J. N. *Photonic crystals: Molding the flow of light*. Princeton University Press, 1995.
- [7] ALLEN, M. *Gap maps for photonic crystals*. 2003.
- [8] BUCHAR, P. *Disperzní charakteristiky kompozitního periodického prostředí*. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Praha, 2004.
- [9] QUEVEDO-TERUEL, O., RAJO-IGLESIAS, E. *Application of Ant Colony Optimization Based on Algorithm to solve different electromagnetic problems*. Madrid, 2006.

## **8 Seznam zkratek**

ACO	Ant Colony Optimization
EBG	Electromagnetic Bandgap
GSM	Global System for Mobile communications
PBG	Photonic Bandgap
TM	Transverse Magnetic

## 9 Seznam symbolů

$b_{1,2}$	základní vektory reciproké mříže
$d(t)$	feromonová trvalost
$d_{1,2}$	základní mřížové vektory
$\Delta\tau_j(t)$	feromonový dodatek
$\gamma$	perioda feromonové eliminace
$f$	kmitočet
$\eta(t)$	hodnota kritériální funkce v iteraci $t$
$\lambda_g$	vlnová délka na periodické struktuře
$p_{i,j}(t)$	pravděpodobnost přechodu do nového uzlu
$\rho$	koeficient feromonové eliminace za periodu
$S_{11}$	činitel odrazu na vstupu
$t$	iterace
$\tau(t)$	množství feromonu v uzlu v iteraci $t$

## 10 Příloha

### Příloha A: Zdrojový kód optimalizace kolonií mravenců v jazyce VBA

```
' *mravenci
' !!! Do not change the line above !!!

Sub Main ()
Const pr As Integer = 16 'pocet rozmeru, se kterymi se budou spoustet analyzy
Const mr As Integer = 9 'pocet mravencu
Const pocetit As Integer = 100 'pocet iteraci
Const dp As Integer = 20 'delka pameti, idealni je cca 1/5 poctu iteraci

Dim amin, amax, bmin, bmax As Double ' meze jednotlivych rozmeru anteny

Dim a(1 To pr) As Double 'optimalizovane rozmery
Dim b(1 To pr) As Double

Dim krit(0 To pr+1, 0 To pr+1) As Double 'kriterialni fce doplnena 0 po okrajich
Dim mravenci(1 To mr, 1 To 2) As Integer 'pozice mravencu(aktualni)
Dim plb(1 To mr, 1 To dp) As Double 'pamet mravencu
Dim bestm(0 To pocetit, 1 To mr, 1 To 7) As Double 'pole osobnich nejlepsich hodnot, obsahuje indexy,
'kriterialni funkci, frekvence a cinitel odrazu na techto frekvencich

Dim iterace As Integer
Dim i, j, m, p, r, x, pomim As Integer 'pomocne indexy
Dim priznak(1 To 8) As Integer
Dim fer(0 To pr+1, 0 To pr+1) As Integer 'matice feromonu
Dim pokus(0 To pr+1, 0 To pr+1) As Integer
Dim pom(0 To pr+1, 0 To pr+1) As Double 'pomocna promenna pro vypocet pravdepodobnosti
Dim gama, dt As Integer 'koeficienty pro vypocet mnozstvi feromonu
Dim f1s(1 To pr, 1 To pr) As Double
Dim f2s(1 To pr, 1 To pr) As Double 'matice pro ulozeni frekvenci
Dim s1(1 To pr, 1 To pr) As Double
Dim s2(1 To pr, 1 To pr) As Double 'matice pro ulozeni s1 l
Dim pravc, f1v, f2v, s1v, s2v, k As Double 'jmenovatel zlomku pro vypocet prechodu,
pomocne promenne
Dim pravb(0 To pr+1, 0 To pr+1) As Double 'pravdepodobnost prechodu do bodu
Dim localbest As Double 'pomocna promenna pro hledani dalsiho bodu prechodu
Dim globalbest(1 To 7) As Double 'celkove maximum

amin=1 'definice rozmeru
amax=17 'delka zarezu
bmin=6
bmax=14 'odstup zarezu s
gama=5 'definice periody fer. eliminace a pozadovanych frekvenci
f1p=2.4
f2p=5

a(1)=amin
For i=2 To pr STEP 1
    a(i)=a(i-1)+(amax-amin)/pr 'nakrokovani prvnioho rozmeru
Next i

b(1)=bmin
For j=2 To pr STEP 1
    b(j)=b(j-1)+(bmax-bmin)/pr 'nakrokovani druheho rozmeru
Next j
'pri krokovani se pouziva drive zadanych mezi a poctu rozmeru pr
```



```

For i=1 To mr STEP 1
    For j=1 To dp STEP 1
        plb(i,j)=0
    Next j
Next i
'naplneni pameti mravencu nulami

For i=0 To pr+1 STEP 1
    For j=0 To pr+1 STEP 1
        krit(i,j)=0
        fer(i,j)=1
        pom(i,j)=0
        pokus(i,j)=0
    Next j
Next i
'zde se nastavuje kriterialni funkce na nulu (indexy jsou vetsi o 1 na kazdou stranu, nuly navíc se používají
'jako "obrana" před pretečením pole), matici feromonu na 1 a dále pomocná proměnná pom na 0

'v tomto cyklu se provedou analýzy s dříve definovanými rozměry (kombinace každý s každým)
For i=1 To pr STEP 1
    For j=1 To pr STEP 1
        storeparameter("a",a(i))
        storeparameter("s",b(j)) 'přenesení rozměru do CST
        Rebuild

        With Solver
            .Start 'spuštění transmitt solver
        End With

        'po analýze se provede vyhodnocení, neboli stanovení kriterialní funkce
        With Result1D("d1(1)1(1)")
            index = .GetMinimumInRange (f1p-0.1,f1p+0.1)
            f1s(i,j) = .GetX(index)
            s1(i,j) = .GetY(index)
            index = .GetMinimumInRange (f2p-0.1,f2p+0.1)
            f2s(i,j) = .GetX(index)
            s2(i,j) = .GetY(index)
        End With
        'odectou se indexy minim v okolí požadovaných frekvencí a stanoví se příslušné frekvence a
        'úroveň činitele
        'odrazu na těchto frekvencích

        k=10
        If s1(i,j) > -10 Or s2(i,j) > -10 Then
            k=1
        End If
        If s1(i,j) > -5 Or s2(i,j) > -5 Then
            k=0.01
        End If
        'pro výpočet kriterialní funkce se stanoví parametr k, který do kriterialní funkce zavádí vliv
        'činitele odrazu
        'vždy se bere v potaz obě hodnoty, k degradování kriterialní funkce stačí jen jeden
        'nevyhovující

        If f1s(i,j)=f1p And f2s(i,j)=f2p Then
            krit(i,j)=k/1E-06 'ošetření možnosti, že se obě frekvence naladí přesně (hrozi
                            'dělení nulou)
        Else
            krit(i,j)=k/((f1p-f1s(i,j))^2 + (f2p-f2s(i,j))^2) 'vlastní výpočet kriterialní funkce
        End If
    Next j
Next i

```

```

        Next j
    Next i

    'umisteni mravencu
    m=0
    r=1
    x=1
    'po umisteni se ulozi aktualni poloha jako osobni maximum mravence bestm
    'ukladaji se indexy, kriterialni funkce a skutecne frekvence
    For i=1 To 3 STEP 1
        For j=1 To 3 STEP 1
            m=m+1
            mravenci(m,1)=r
            mravenci(m,2)=x
            bestm(0,m,1)=r
            bestm(0,m,2)=x
            bestm(0,m,3)=krit(r,x)
            bestm(0,m,4)=f1s(r,x)
            bestm(0,m,5)=f2s(r,x)
            bestm(0,m,6)=s1(r,x)
            bestm(0,m,7)=s2(r,x)
            x=(pr\2)*j
        Next j
        x=1
        r=(pr\2)*i
    Next i

```

```

'soubory, do kterych se ukladeji vysledky
Open "D:\Mravenci\bestm3.txt" For Output As #3
Open "D:\Mravenci\bestm1.txt" For Output As #1
Open "D:\Mravenci\bestm2.txt" For Output As #2
Open "D:\Mravenci\frekvence1.txt" For Output As #4
Open "D:\Mravenci\frekvence2.txt" For Output As #5
Open "D:\Mravenci\krit.txt" For Output As #6
Open "D:\Mravenci\fer.txt" For Output As #7
Open "D:\Mravenci\rozmer1.txt" For Output As #8
Open "D:\Mravenci\rozmer2.txt" For Output As #9
Open "D:\Mravenci\s11a.txt" For Output As #11
Open "D:\Mravenci\s11b.txt" For Output As #12

```

```

r=1
'vypis kriterialni funkce
For i=1 To pr
    For j=1 To pr
        Print#6, krit(i,j);
    Next j
    Print#6,
Next i
Close #6

```

```

'zacatek vypisovani osobnich maxim
For m=1 To mr
    Print#3, bestm(0,m,3);
    Print#1, bestm(0,m,1);
    Print#2, bestm(0,m,2);
    Print#4, bestm(0,m,4);
    Print#5, bestm(0,m,5);
    Print#11, bestm(0,m,6);
    Print#12, bestm(0,m,7);

```

```

Next m
Print#1,
Print#2,
Print#3,
Print#4,
Print#5,
Print#11,
Print#12,

For iterace=1 To pocetit STEP 1
    If (iterace Mod gama) = 0 Then                'definice vyprchavani feromonu
        dt=1
    Else
        dt=0
    End If
    For m=1 To mr STEP 1
        'pro kazdeho mravence se ulozi pozice z predchozi iterace do i a j
        i=mravenci(m,1)
        j=mravenci(m,2)

        'provadi se prohledavani okolnich bodu aktualni pozice a vypocitava se
        'pravdepodobnost prechodu do jednotlivych bodu
        For p=i-1 To i+1 STEP 1                    'tady pocitam citatel do vzorce
            pom(p,j-1)=fer(p,j-1)*(krit(p,j-1)^30)
        Next p
        pom(i+1,j)=fer(i+1,j)*(krit(i+1,j)^30)
        For p=i-1 To i+1 STEP 1
            pom(p,j+1)=fer(p,j+1)*(krit(p,j+1)^30)
        Next p
        pom(i-1,j)=fer(i-1,j)*(krit(i-1,j)^30)

        'urceni jmenovatele
        prave = pom(i-1,j-1) + pom(i,j-1) + pom(i+1,j-1) + pom(i+1,j) + pom(i+1,j+1) +
        pom(i,j+1) + pom(i-1,j+1) + pom(i-1,j)

        'vypocet pravdepodobnosti prechodu do jednotlivych okolnich bodu, zaroven se
        'jednotlive body porovnavaji s pameti mravence,
        'pokud se nektery bod shoduje s pameti, je mu prirazen priznak
        x=1
        For p=i-1 To i+1 STEP 1
            pravb(p,j-1)=pom(p,j-1)/prave
            priznak(x)=0
            For pomin=1 To dp STEP 1
                If krit(p,j-1)=plb(m,pomin) Then
                    priznak(x)=1
                End If
            Next pomin
            x=x+1
        Next p

        pravb(i+1,j)=pom(i+1,j)/prave
        priznak(x)=0
        For pomin=1 To dp STEP 1
            If krit(i+1,j)=plb(m,pomin) Then
                priznak(x)=1
            End If
        Next pomin
        x=x+1

        For p=i-1 To i+1 STEP 1

```

```

        pravb(p,j+1)=pom(p,j+1)/pravc
        priznak(x)=0
        For pomin=1 To dp STEP 1
            If krit(p,j+1)=plb(m,pomin) Then
                priznak(x)=1
            End If
        Next pomin
        x=x+1
    Next p

    pravb(i-1,j)=pom(i-1,j)/pravc
    priznak(x)=0
    For pomin=1 To dp STEP 1
        If krit(i-1,j)=plb(m,pomin) Then
            priznak(x)=1
        End If
    Next pomin

    'zde se vybere bod s nejvetsi pravdepodobnosti prechodu, podminkou vyberu je, ze
    'onen bod nema
    'prirazen priznak ani neni nulovy (osetreni pretečení pole)
    '8-krat se provado porovnani proto, ze je to pocet okolnich bodu v matici
    If priznak(1)=0 And krit(i-1,j-1) <> 0 Then
        mravenci(m,1)=i-1      'do pole mravenci si ulozim indexy vybrane pozice
        mravenci(m,2)=j-1
        localbest=pravb(i-1,j-1) 'tuto promennou pouzivam pro kontrolu velikosti
                                'pravdepodobnosti
    Else
        localbest=0
    End If
    If localbest < pravb(i,j-1) And priznak(2)=0 _
    And krit(i,j-1) <> 0 Then
        mravenci(m,1)=i
        mravenci(m,2)=j-1
        localbest=pravb(i,j-1)
    End If
    If localbest < pravb(i+1,j-1) And priznak(3)=0 _
    And krit(i+1,j-1) <> 0 Then
        mravenci(m,1)=i+1
        mravenci(m,2)=j-1
        localbest=pravb(i+1,j-1)
    End If
    If localbest < pravb(i+1,j) And priznak(4)=0 _
    And krit(i+1,j) <> 0 Then
        mravenci(m,1)=i+1
        mravenci(m,2)=j
        localbest=pravb(i+1,j)
    End If
    If localbest < pravb(i+1,j+1) And priznak(7)=0 _
    And krit(i+1,j+1) <> 0 Then
        mravenci(m,1)=i+1
        mravenci(m,2)=j+1
        localbest=pravb(i+1,j+1)
    End If
    If localbest < pravb(i,j+1) And priznak(6)=0 _
    And krit(i,j+1) <> 0 Then
        mravenci(m,1)=i
        mravenci(m,2)=j+1
        localbest=pravb(i,j+1)
    End If

```

```

If localbest < pravb(i-1,j+1) And priznak(5)=0 _
And krit(i-1,j+1) <> 0 Then
    mravenci(m,1)=i-1
    mravenci(m,2)=j+1
    localbest=pravb(i-1,j+1)
End If
If localbest < pravb(i-1,j) And priznak(8)=0 _
And krit(i-1,j) <> 0 Then
    mravenci(m,1)=i-1
    mravenci(m,2)=j
End If

'po vyberu najlepsioho okolniho bodu zvysim hodnotu feromomu v tomto bode o
'feromonovy dodatek,
'pripadne uplatnim snizeni o feromonovou trvalost
'dale si novy bod ulozim do pameti mravence plb
fer(mravenci(m,1), mravenci(m,2)) = fer(mravenci(m,1), mravenci(m,2))+1-dt
plb(m,r)=krit(i,j)

'zde se resi pripadne dosazeni konce pameti a nasledne postupne prepisovani pameti
'od zacatku,
'neboli zapominani mravence
r=r+1
If r > dp Then
    r=1
End If

'zde porovnavam aktualni polohu mravence s jeho osobnim maximem, kriteriem pro
'prepis je nizsi
'(horsi) kriterialni funkce
'pokud je nova hodnota horsi, presune se na nove misto v pameti stavajici hodnota
If bestm(iterace-1,m,3) < krit(mravenci(m,1),mravenci(m,2)) Then
    bestm(iterace,m,1)=mravenci(m,1)
    bestm(iterace,m,2)=mravenci(m,2)
    bestm(iterace,m,3)=krit(mravenci(m,1),mravenci(m,2))
    bestm(iterace,m,4)=f1s(mravenci(m,1),mravenci(m,2))
    bestm(iterace,m,5)=f2s(mravenci(m,1),mravenci(m,2))
    bestm(iterace,m,6)=s1(mravenci(m,1),mravenci(m,2))
    bestm(iterace,m,7)=s2(mravenci(m,1),mravenci(m,2))
Else
    bestm(iterace,m,1)=bestm(iterace-1,m,1)
    bestm(iterace,m,2)=bestm(iterace-1,m,2)
    bestm(iterace,m,3)=bestm(iterace-1,m,3)
    bestm(iterace,m,4)=bestm(iterace-1,m,4)
    bestm(iterace,m,5)=bestm(iterace-1,m,5)
    bestm(iterace,m,6)=bestm(iterace-1,m,6)
    bestm(iterace,m,7)=bestm(iterace-1,m,7)
End If

'zde provadam vypis vseh parametru ulozenych v bestm a take rozmeru prislusich '
temto hodnotam
Print#3, bestm(iterace,m,3);
Print#1, bestm(iterace,m,1);
Print#2, bestm(iterace,m,2);
Print#4, bestm(iterace,m,4);
Print#5, bestm(iterace,m,5);
Print#11, bestm(iterace,m,6);
Print#12, bestm(iterace,m,7);
Print#8, a(bestm(iterace,m,1));
Print#9, b(bestm(iterace,m,2));

```

```

        Next m
        Print#2,
        Print#3,
        Print#1,
        Print#4,
        Print#5,
        Print#8,
        Print#9,
        Print#11,
        Print#12,
    Next iterace
    Close #2
    Close #3
    Close #1
    Close #4
    Close #5
    Close #8
    Close #9
    Close #11
    Close #12

'vypis matice feromonu, jde pouze o pomucku pro kontrolu pohybu mravencu v matici
For i=0 To pr+1
    For j=0 To pr+1
        Print#7, fer(i,j);
    Next j
    Print#7,
Next i
Close #7

'z osobnich maxim mravencu vyberu nejlepsi hodnotu, se kterou se nasledne provede analyza
globalbest(1)=bestm(pocetit,1,1)
globalbest(2)=bestm(pocetit,1,2)
globalbest(3)=bestm(pocetit,1,3)
globalbest(4)=bestm(pocetit,1,4)
globalbest(5)=bestm(pocetit,1,5)
globalbest(6)=bestm(pocetit,1,6)
globalbest(7)=bestm(pocetit,1,7)

For m=2 To mr STEP 1          'porovnavam best hodnoty jednotlivych mravencu a vyberu toho s nejvyssi
krit.fci.
    If globalbest(3) < bestm(pocetit,m,3) Then
        globalbest(1)=bestm(pocetit,m,1)
        globalbest(2)=bestm(pocetit,m,2)
        globalbest(3)=bestm(pocetit,m,3)
        globalbest(4)=bestm(pocetit,m,4)
        globalbest(5)=bestm(pocetit,m,5)
        globalbest(6)=bestm(pocetit,m,6)
        globalbest(7)=bestm(pocetit,m,7)
    End If
Next m

'Vypis nalezeného nejlepšího řešení - indexy v matici, kritériální funkce, frekvence a příslušné rozměry
Open "D:\Mravenci\gb.txt" For Output As #10
For m=1 To 7
    Print#10,globalbest(m)
Next m
Print#10,a(globalbest(1))
Print#10,b(globalbest(2))
Close #10

```

```

's nalezenym nejlepsim resenim spustim analyzu
storeparameter("a",a(globalbest(1)))
storeparameter("s",b(globalbest(2)))
Rebuild
'ted se provede simulace
With Solver
    .Start          'spusteni transmient solver
End With

'po analyze opet provedu odecetni minim, kvuli ziskani hodnot cinitele odrazu
With Result1D("d1(1)1(1)")
    index = .GetMinimumInRange (f1p-0.1,f1p+0.1)
    f1v = .GetX(index)
    s1v = .GetY(index)
    index = .GetMinimumInRange (f2p-0.1,f2p+0.1)
    f2v = .GetX(index)
    s2v = .GetY(index)
End With

'vypis frekvenci a hodnot cinitele odrazu
Open "D:\Mravenci\vysledky.txt" For Output As #20
Print#20,f1v;s1v;f2v;s2v
Close#20
End Sub

```